Traité Élémentaire

DE

PHYSIQUE

Propriété de

J. de GIGORD.

DU MÊME AUTEUR :

Cours Élémentaire de Physique, rédigé conformément aux programmes officiels. (Quatrième et Troisième B; Seconde, Première et Philosophie A et B). 7e *édition* (*sous presse*). In-8° cavalier, 622 gravures dans le texte et une planche en couleurs. *Broché* . . . . **6 fr. »**

Toile pleine . . . . **7 fr. »**

Problèmes de Physique, énoncés et solutions, 3e *édition*. In-18. *Broché* . . . . **1 fr. 50**

Traite Elémentaire

DE

PHYSIQUE

RÉDIGÉ CONFORMÉMENT AUX PROGRAMMES OFFICIELS

CINQUIÈME ÉDITION

PARIS
J. DE GIGORD, ÉDITEUR
1914

NOTIONS DE MÉCANIQUE

La Mécanique est la science qui traite du mouvement et de ses causes.

MOUVEMENTS

Un point matériel est dit en mouvement quand il change de position; la ligne qu'il décrit se nomme **trajectoire**. Une trajectoire est rectiligne ou curviligne. Le mouvement est déterminé par la trajectoire et par la position du mobile, à un temps t, sur cette trajectoire.

MOUVEMENT UNIFORME

1. **Mouvement rectiligne uniforme**. — Un mouvement rectiligne est *uniforme*, si le mobile se déplace toujours dans le même sens et parcourt des espaces égaux en des temps égaux, quels que soient ces temps. L'espace parcouru est proportionnel au temps.

On nomme **vitesse** l'espace v parcouru en une seconde. Soit A la position initiale du mobile (fig. 1), l'espace AM parcouru sera v après une seconde..., vt après t secondes. *L'équation du mouvement :*

$$e = vt,$$

est la relation entre l'espace parcouru et le temps employé à le parcourir.

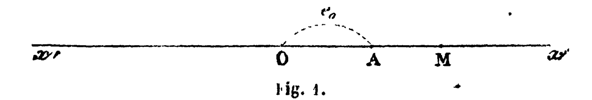


Fig. 1.

La vitesse est le rapport constant de la longueur parcourue au temps employé à la parcourir; e étant exprimé en centimètres et t en secondes, e ou v représente un certain nombre de centimètres par seconde. Les mouvements uniformes se distinguent par leurs vitesses.

Lorsque, à l'origine du temps, le mobile a déjà parcouru un espace OA

ou e_0 (fig. 1), si l'espace e_0 a été parcouru dans le sens du mouvement actuel, l'espace total OM parcouru au temps t est donné par l'équation

$$e = e_0 + vt; \text{ la vitesse est } v = \frac{e - e_0}{t}.$$

Les espaces sont comptés positivement dans un sens Ox, négativement dans le sens Ox'. Si, à partir de l'origine du temps, l'espace est parcouru dans le sens Ax', tandis que e_0 avait été parcouru dans le sens Ox, l'équation du mouvement devient : $e = e_0 - vt$.

MOUVEMENT VARIÉ

2. Tout mouvement dans lequel le mobile parcourt des espaces inégaux dans des temps égaux est dit *varié*.

Définition de la vitesse. — Soit M la position du mobile au temps t, M_1 sa position au temps $t + \theta$, $MM_1 = \varepsilon$ (fig. 2).

$\frac{MM_1}{\theta} = \frac{\varepsilon}{\theta}$ se nomme la *vitesse moyenne* du mobile pendant le temps θ, c'est la vitesse d'un mobile qui se trouverait en même temps que le mo-

O M M_1

Fig. 2.

bile vrai en M et en M_1, et qui parcourrait d'un mouvement uniforme l'intervalle MM_1. *Ce mobile fictif s'écartera d'autant moins du mobile vrai* que le temps θ sera plus court.

Un espace $MM'_1 = \varepsilon'$, inférieur à ε, étant parcouru dans un temps θ', inférieur à θ, $\frac{\varepsilon'}{\theta'}$ est la vitesse moyenne pendant le temps θ'.

Lorsque les espaces ε, ε', pris à partir de M vont en décroissant, il en est de même de θ et de θ'; les quotients $\frac{\varepsilon}{\theta}$, $\frac{\varepsilon'}{\theta'}$ diffèrent de moins en moins à mesure que ε et θ diminuent. Lorsque ε et θ tendent vers zéro, les variations de ε sont sensiblement proportionnelles aux variations de θ, et $\frac{\varepsilon}{\theta}$ tend vers une limite déterminée : cette *limite* est appelée *vitesse du mobile à l'instant t;* c'est la vitesse moyenne correspondant à une durée extrêmement courte au voisinage du temps t.

Si, dans un mouvement particulier, à un temps t, la limite $\frac{\varepsilon}{\theta}$ est égale à 5, l'espace ε parcouru pendant un temps θ extrêmement court, en deçà ou au delà de t, est égal à 5θ, ou bien la vitesse du mobile est, au temps précis t, la *vitesse d'un mouvement uniforme* dans lequel le mobile parcourrait 5 centimètres par seconde.

Lorsque la loi du mouvement est exprimée par une relation $e = f(t)$, qui donne l'espace OM parcouru par le mobile à un temps t quelconque,

la vitesse, égale à lim. $\frac{s}{\theta}$, est la *dérivée* algébrique, au temps t, de l'espace par rapport au temps.

3. Mouvement rectiligne uniformément varié. — Si la vitesse v, ainsi définie, varie de quantités égales dans des temps égaux, quels que soient ces temps, le mouvement est dit *uniformément varié :* la variation γ de la vitesse par seconde est appelée **accélération.**

Mouvement uniformément accéléré. — Le mouvement est dit uniformément accéléré si la vitesse croît proportionnellement au temps; v_0 désignant la vitesse au temps zéro, la vitesse sera $v_0 + \gamma$ après une seconde, $v_0 + \gamma t$ après t secondes.

$$v = v_0 + \gamma t \ (1)$$

est la relation entre la vitesse et le temps.

De cette *loi des vitesses* on déduit la *loi des espaces,* ou l'espace parcouru par le mobile depuis le temps zéro jusqu'au temps t.

On sait, en effet, trouver algébriquement la fonction $e = f(t)$ qui a pour dérivée $v = v_0 + \gamma t$. Elle a pour expression :

$$e = e_0 + v_0 t + \frac{\gamma t^2}{2} \ (2).$$

Inversement, si cette loi des espaces est donnée, on sait en déduire algébriquement la loi des vitesses : $v = v_0 + \gamma t$.

Ceci est général : à une loi des espaces $e = f(t)$ correspond une loi des vitesses $v = f'(t)$; on déduit algébriquement l'une de l'autre, et l'une des deux suffit pour caractériser le mouvement.

Dans un mouvement uniformément accéléré, lorsque $e_0 = 0$ et $v_0 = 0$, la vitesse et l'espace sont exprimés par $v = \gamma t$, $e = \frac{\gamma t^2}{2}$ (par exemple : chute d'un corps qui part du repos sans vitesse initiale).

Pour obtenir la vitesse au moment où l'espace parcouru par le mobile est e, on élimine t entre les équations (1) et (2); on trouve

$$v^2 - v_0^2 = 2\gamma\,(e - e_0)\ ^{(1)}$$

et si $v_0 = 0$ et $e_0 = 0$ on a : $v = \sqrt{2\gamma e}$.

Mouvement uniformément retardé. — Le mouvement est appelé *uniformément retardé* si la vitesse décroît proportionnellement au temps.

Désignons par v_0 la vitesse initiale, $v_0 - \gamma$ sera la vitesse après une seconde, $v_0 - 2\gamma$ après deux secondes, $v_0 - \gamma t$ après t secondes,

$$v = v_0 - \gamma t.$$

---

(1) Ce résultat s'obtient en substituant à t dans l'équation (2) sa valeur tirée de l'équation (1). On y arrive rapidement en écrivant :

$$v^2 = (v_0 + \gamma t)^2 = v_0^2 + 2v_0\gamma t + \gamma^2 t^2$$
$$= v_0^2 + 2\gamma\left(v_0 t + \frac{1}{2}\gamma t^2\right) = v_0^2 + 2\gamma\,(e - e_0).$$

On déduit de la loi des vitesses la loi des espaces ; on trouve :

$$e = e_0 + v_0 t - \frac{\gamma t^2}{2}.$$

Inversement, de la loi des espaces on passe à la loi des vitesses.

La formule unique $v = v_0 + \gamma t$ s'applique à tout mouvement uniformément varié, en regardant γ comme positif si les vitesses successives s'ajoutent à la vitesse initiale et comme négatif si elles s'en retranchent.

4. Mouvements périodiques. — Parmi les mouvements variés, les mouvements périodiques sont de ceux que l'on rencontre le plus souvent en physique.

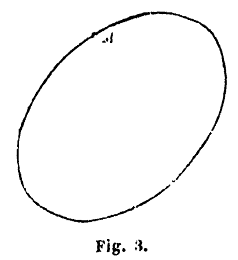


Fig. 3.

On dit périodique le mouvement d'un mobile M qui décrit une trajectoire fixe (fig. 3) et reprend une même position à des intervalles de temps égaux. Les mouvements des planètes autour du soleil sont des mouvements périodiques. Lorsque la trajectoire se compose de deux portions de courbe repliées l'une sur l'autre, l'aller et le retour ayant lieu sur une même courbe (fig. 4 et 5, segment de droite ou arc de cercle) de A en A′ et de A′ en A, le mouvement est dit **oscillatoire**. Un pendule d'horloge, un piston de machine à vapeur, ont des mouvements oscillatoires.

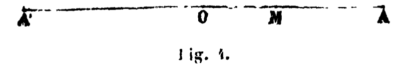


Fig. 4.

La *période* est le temps constant qui sépare deux passages consécutifs du mobile en un même point M et dans le même sens.

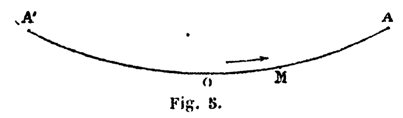


Fig. 5.

L'*amplitude* du mouvement est la distance qui sépare sur la trajectoire deux positions extrêmes consécutives, A et A′, du mobile.

5. Représentation graphique d'un mouvement. — Les particularités du mouvement d'un mobile peuvent être représentées graphiquement. Sur une droite horizontale, dite ligne des **abscisses**, on porte, à partir d'un point appelé origine, une succession de longueurs égales figurant des temps égaux ; une longueur *ab* représentera une seconde, la longueur triple *ad*, trois secondes... (fig. 6). A chacun des points de division, on élève une perpendiculaire ou **ordonnée** sur laquelle on prend une longueur proportionnelle à l'espace parcouru, au temps correspondant ; M*b* sera l'espace après une seconde, P*d* après trois secondes. La courbe qui réunit les extrémités des ordonnées représente le mouvement.

Un mouvement *uniforme*, où des espaces égaux NG, PH... sont parcourus en des temps égaux *bc, cd*... est figuré par une droite MP (fig. 6) (1).

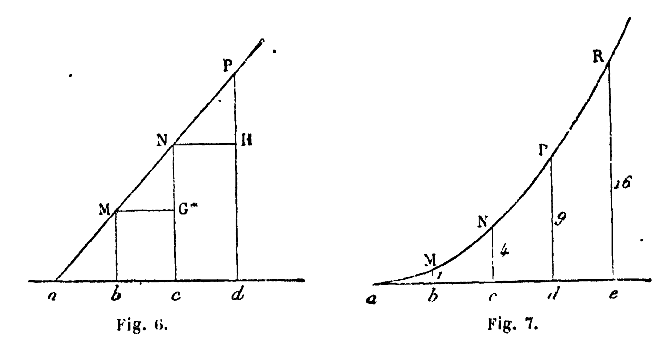


Fig. 6. Fig. 7.

Pour un mouvement *uniformément accéléré* où l'espace est $e = \frac{1}{2} gt^2$, les ordonnées aux temps 1, 2, 3, 4, seront e_1, $4e_1$, $9e_1$, $16e_1$. La courbe est une parabole (fig. 7).

Dans un mouvement *périodique* (**4**), la courbe se reproduit à des intervalles de temps égaux; le temps *ab* qui sépare deux ordonnées M*a*, N*b*, semblablement placées sur la courbe est la *période* (fig. 8).

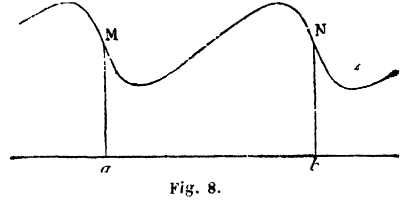


Fig. 8.

COMPOSITION DES MOUVEMENTS

6. Lorsque deux mouvements produisent simultanément leurs effets sur un point O, si pendant un temps *t* l'un des déplacements est O*a* et l'autre O*b*, on obtient l'effet résultant en formant le parallélogramme dont O*a* et O*b* sont les côtés. Au temps *t*, le point se trouve à l'extrémité *c* de la diagonale du parallélogramme (fig. 9). On dit que O*c* est la *somme géométrique* de O*a* et O*b*.

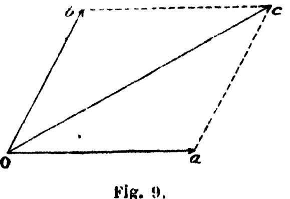


Fig. 9.

Inversement, on peut décomposer un mouvement O*c*, ou trouver deux mouvements O*a* et O*b* dont l'effet simultané produit le déplacement O*c*.

Appliquée à l'unité de temps, cette règle donne la *composition des vitesses*. Si, à un moment donné, un point reçoit une vitesse O*a* et en même temps une vitesse O*b*, il prend la vitesse *résultante* O*c*.

(1) Sur un papier quadrillé, les points figuratifs sont faciles à placer.

MOUVEMENT CURVILIGNE

La vitesse et l'accélération ont été définies pour des trajectoires rectilignes ; leurs définitions se généralisent pour une trajectoire courbe.

7. Vitesse. — Prenons sur la trajectoire (fig. 10) deux positions M et M′ du mobile à des temps voisins t et $t + \theta$. Si l'on substitue à l'arc de trajectoire MM′ la corde MM′ que l'on suppose parcourue pendant le même temps θ, la vitesse moyenne d'un mobile fictif qui parcourrait cette corde est $\frac{MM'}{\theta}$.

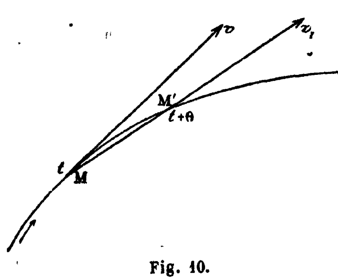


Fig. 10.

On appelle vitesse d'un mouvement curviligne en M, à l'instant t, la limite du rapport $\frac{MM'}{\theta}$. La *direction* de la vitesse est la direction limite de la corde MM′ ou la tangente en M.

La vitesse se calcule comme pour un mouvement rectiligne varié. Si le mouvement sur la trajectoire est défini par une relation $s = f(t)$, où s est l'arc décrit à partir d'un point de départ, la vitesse au temps t est exprimée par $v = lim. \frac{\Delta s}{\Delta t}$, dérivée de l'espace par rapport au temps.

Dans un mouvement *curviligne uniforme*, l'arc parcouru sur la trajectoire est proportionnel au temps : $s = bt$, la vitesse est $v = b$, sa valeur est constante en grandeur, mais en chaque point, elle est dirigée suivant la tangente en ce point.

Comme on donne le nom de ***vecteur*** à un segment de droite ayant une *longueur*, une *direction* et un *sens* déterminés, une vitesse est représentée par un vecteur Mv pris sur la tangente en M.

8. Mouvement circulaire. — Quand la trajectoire d'un mobile est une circonférence de rayon R (fig. 11), la vitesse moyenne de M en M′ est $\frac{MM'}{\theta}$ ou $\frac{R\alpha}{\theta}$, α désignant l'angle MCM′ dont a tourné le rayon CM. Le rapport $\frac{\alpha}{\theta}$ est la *vitesse angulaire moyenne* du mobile pendant le temps θ, il tend vers une limite ω quand θ et α diminuent. Cette limite est la ***vitesse angulaire*** en M. La vitesse du mobile au temps t, dirigée suivant la tangente en M, est égale à Rω.

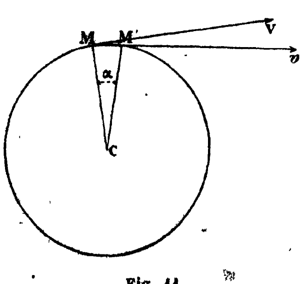


Fig. 11.

L'angle ω dont tourne le rayon CM par seconde est constant pour un

mouvement circulaire *uniforme*. En désignant par T la durée de la révolution du mobile sur la circonférence,

$$vT = \omega RT = 2\pi R, \quad \text{d'où } T = \frac{2\pi}{\omega}, \text{ et } \omega = \frac{2\pi}{T}.$$

9. Accélération. — Supposons que le mobile est en M l'instant t et en M' à l'instant très voisin $t + \theta$ (fig. 12). Soient Mv et $M'v'$ ses vitesses en M et en M'. Menons par M un segment de droite Mv'_1 égal et parallèle à $M'v'$ Joignons vv'_1; Mv'_1, diagonale du parallélogramme construit sur Mv et vv'_1, est la *somme géométrique* de Mv et vv'_1, c'est la vitesse en M'; par suite, vv'_1 représente la variation de la vitesse pendant le temps θ du parcours MM'; le rapport $\frac{vv'_1}{\theta}$, est dit l'accélération moyenne du mouvement de M en M'.

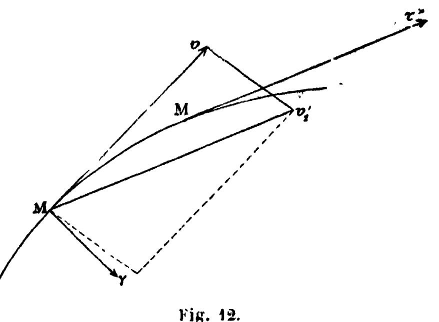


Fig. 12.

vv'_1 décroît avec θ et le rapport $\frac{vv'_1}{\theta}$ tend vers une limite.

La valeur limite de ce rapport et la direction limite $M\gamma$ de vv'_1 sont la *grandeur* et la *direction* de l'accélération en M.

10. Accélération dans un mouvement circulaire uniforme. — Quand un mobile décrit une circonférence d'un mouvement circulaire uniforme, la vitesse v change à chaque instant de direction et l'accélération n'est pas nulle, elle est dans le plan de la courbe comme les deux vitesses en M et M'.

Si, en M, on mène Mv et Mv'_1, le triangle vMv'_1 est isocèle puisque les deux vitesses sont égales. Les deux triangles MCM', vMv'_1 ont leurs côtés respectivement *perpendiculaires* et sont semblables (fig. 13) :

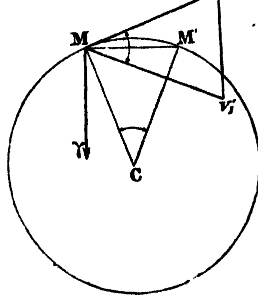


Fig. 13.

$$\frac{vv'_1}{MM'} = \frac{Mv}{MC} = \frac{v}{R}; \text{ d'où } vv'_1 = MM'. \frac{v}{R}$$

$$\text{et Lim. } \frac{vv'_1}{\theta} = \text{lim. } \frac{MM'}{\theta}. \frac{v}{R} = v\frac{v}{R}, \text{ puisque } v = \text{lim. } \frac{MM'}{\theta}.$$

L'accélération est donc constante en grandeur et égale à $\frac{v^2}{R}$ ou $\omega^2 R$.

M' venant se confondre avec M, la droite $M\gamma$, parallèle à vv'_1 prend la direction MC, puisque vv'_1 est perpendiculaire à MM'. L'accélération $M\gamma$ est ainsi dirigée suivant le rayon en M et vers le centre, elle est *centripète*.

MOUVEMENT D'UN SYSTÈME MATÉRIEL

11. Le mouvement d'un système de points résulte du mouvement de chacun d'eux.

Le système a un *mouvement d'ensemble* lorsque ses points se maintiennent aux mêmes distances relatives.

Lorsque tous les points d'un corps possèdent au même instant des vitesses égales et parallèles, le mouvement est dit ***de translation*** (chute d'un solide); la vitesse commune est la vitesse de translation.

Si chaque point du corps décrit une circonférence dont le plan est perpendiculaire à un axe fixe, le mouvement est dit ***de rotation*** (mouvement de la terre autour de la ligne de ses pôles, mouvement d'un volant de machine, mouvement d'un fléau de balance); la vitesse angulaire est la vitesse d'un point situé à l'unité de distance de l'axe.

FORCES

12 Forces. — Un point matériel ne peut modifier de lui-même son état de repos ou de mouvement (**26**). Toute cause qui engendre ou modifie un mouvement est appelée *force* (1).

La pesanteur est une force qui fait tomber les corps; l'effort qu'un être animé exerce en poussant ou tirant un corps, la pression d'une vapeur contre un piston, une attraction électrique sont des forces.

Il y a à considérer dans une force : 1° le ***point d'application*** ou la position du point sur lequel agit la force; 2° la ***direction*** ou la droite suivant laquelle agit la force et le ***sens*** que suit le point d'application s'il obéit à la force; 3° l'***intensité*** ou la grandeur de l'effort exercé.

Une force est dite *constante* si sa direction, son sens et son intensité ne varient pas.

Une force manifeste son action de deux façons : 1° par le mouvement qu'elle imprime à un corps; 2° par la pression qu'elle exerce sur ce corps maintenu en repos.

Forces égales. — Si deux forces appliquées au même point d'un corps en repos peuvent lui donner le même mouvement, leurs ***intensités sont dites égales***. Une force F est dite valoir *n* fois une autre force *f*, si elle produit le même effet que *n* forces égales à *f*.

Forces en équilibre. — Des forces se neutralisent ou *se font équilibre* quand on peut les supprimer sans que le mouvement du corps auquel elles sont appliquées simultanément soit changé.

Deux forces égales, appliquées au même point et directement opposées, se font équilibre.

---

(1) La notion de force se déduit de la sensation de l'effort idéal qu'il nous faudrait exercer pour produire un mouvement. Nous ne voyons pas une force, mais son effet.

L'égalité de deux forces peut être reconnue par l'égalité du mouvement qu'elles donnent à un même corps (*méthode dynamique*), ou par une observation d'équilibre (*méthode statique*).

13. Représentation d'une force. — En attribuant une longueur à l'unité de force, on représente l'intensité d'une force en menant, par son

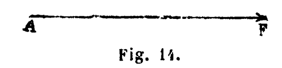


Fig. 14.

point d'application A, un vecteur qui a la direction de la force et dont la longueur AF vaut le nombre d'unités de force qui produisent le même effet (fig. 14).

On représente encore une force par un certain nombre de petites droites, parallèles à la direction de la force, égales à l'unité de force, distribuées uniformément sur une unité de surface perpendiculaire à la direction de la force et passant par son point d'application. Le nombre de ces droites s'appelle, en électricité, ***flux de force*** par unité de surface.

14. Transport d'une force en un point de sa direction. — Une force F appliquée en un point A d'un corps peut être transportée en un point quelconque B de sa direction, invariablement lié au point A, sans que son effet soit changé.

Appliquons en effet au point B deux forces F_1 et F_2 égales à F et de sens opposés, rien ne sera modifié; mais comme on constate que deux forces égales et contraires appliquées en A et en B se neutralisent, on peut les supprimer, et il ne reste qu'une force F_2 appliquée en B, égale à la force appliquée en A et de même sens (fig. 15).

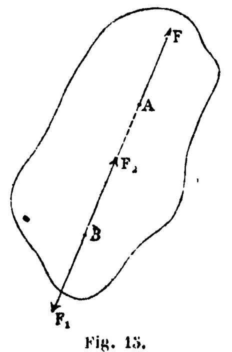


Fig. 15.

15. Mesure statique des forces. — On compare les forces à l'aide d'appareils appelés **dynamomètres**. Un dynamomètre est un ressort élastique dont la déformation croît avec l'effort qu'on lui applique. Deux forces égales produisent la même déformation. On fait usage de ressorts faibles pour les petites forces, de ressorts puissants pour les grandes forces. Ils ne doivent pas être déformés d'une façon permanente par les efforts qu'on exerce sur eux.

On *mesure* une force en comparant la déformation qu'elle produit à la déformation que produit une force spéciale choisie pour unité. Une force qui produit la même déformation que *n* unités de force agissant ensemble vaut *n* unités.

Peson. — Le *peson* est un exemple de dynamomètre (fig. 16). C'est une lame d'acier courbée en forme de V; chacune des branches porte à l'une de ses extrémités un arc de cercle métallique qui traverse librement l'autre branche; l'arc CD, fixé en C à la branche inférieure, est terminé par un anneau D qui soutient le dynamomètre. L'arc AE, fixé en A à la branche supérieure, porte en E un crochet auquel on applique la force.

Les deux branches du ressort se rapprochent par flexion; l'arc CD dépasse la branche BA et le rapprochement des deux branches se lit sur une division que porte l'arc CD. L'instrument est *gradué* en appliquant successivement en E des forces égales à 1, 2, 3,... *n* unités de force et en marquant 1, 2, 3,... *n* sur CD aux points où s'arrête la branche BA. Si l'on applique ensuite au crochet E une force à mesurer, la division à laquelle s'arrête sur CD le bord de la branche BA indique l'intensité de la force.

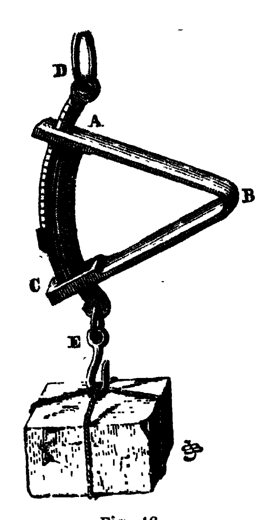


Fig. 16.

COMPOSITION DES FORCES

16. Résultante et composantes. — On appelle *résultante* de plusieurs forces agissant simultanément une force unique, capable de produire seule le même effet. Les forces données sont les *composantes*.

Plusieurs forces appliquées à un corps ne peuvent être remplacées par une force unique que dans certains cas particuliers.

17 COMPOSITION DES FORCES APPLIQUÉES EN UN POINT. — Des forces concourantes ont une résultante.

Composition de deux forces agissant suivant une même droite. — Deux forces de même sens ont une résultante de même sens égale à leur somme. Deux forces de sens contraires ont une résultante égale à leur différence et ayant le sens de la plus grande. Par conséquent, en donnant aux segments représentatifs des forces, portés à partir d'un point O, sur leur direction commune, des signes positifs ou négatifs suivant leur sens, la résultante de plusieurs forces qui agissent suivant une même droite est égale à leur somme algébrique.

Composition de deux forces concourantes. — Parallélogramme des forces. — On démontre que deux forces, F et F′, de directions différentes, appliquées en A, ont une résultante R *représentée en grandeur, en direction et en sens par la diagonale* AD *du parallélogramme* construit sur les forces AB et AC (fig. 17).

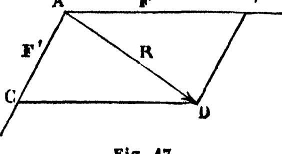


Fig. 17.

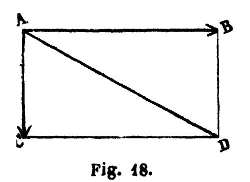


Fig. 18.

Si les deux composantes sont rectangulaires, le parallélogramme devient un rectangle (fig. 18).

La résultante R est la somme géométrique des deux *vecteurs* F et F′. Les deux forces et leur résultante forment un *triangle*. On construit ce triangle en menant en AB l'une des forces F ; puis, par l'extrémité B, une droite BD égale, parallèle à la force F′ et de même sens ; on joint au point A l'extrémité D. La résultante R est inférieure à la somme F + F′.

Si les forces sont rectangulaires, $R^2 = F^2 + F'^2$ (fig. 18) ; $F = R \cos \alpha$ et $F' = R \sin \alpha$ (α est l'angle de F et de R).

Composition de plusieurs forces concourantes. — Appelons F, F_1, F_2, F_3 les forces à composer. On mène à l'extrémité de F une parallèle égale à F_1 et de même sens ; AR_1 est la résultante de F et de F_1. On compose AR_1 et F_2 en menant par R_1 une parallèle égale à F_2 et de même sens ; AR_2 est la résultante de AR_1 et F_2 ou de F, F_1 et F_2. On compose AR_2 et F_3... (fig. 19).

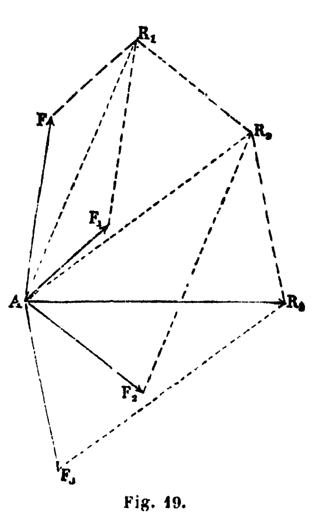


Fig. 19.

Polygone des forces. — Les résultantes intermédiaires AR_1 AR_2.., peuvent être supprimées, car la construction revient à porter bout à bout les forces données avec leur sens ; la résultante AR ferme la ligne brisée en joignant au point de départ A l'extrémité R de la dernière parallèle (ici AR_3).

Le polygone $AFR_1R_2R_3$, dit *polygone des forces*, est *plan* si les forces sont dans un même plan, sinon il est *gauche*. La résultante ne dépend pas de l'ordre de succession des vecteurs.

Comme la somme algébrique des projections sur un axe des segments d'un contour polygonal est égale à la projection du segment AR qui ferme le contour, la *projection sur un axe de la résultante de forces concourantes est égale à la somme algébrique des projections des composantes.*

Cas de trois forces. — Pour trois forces AF, AF_1, AF_2 qui ne sont pas dans un même plan, la résultante AR est la diagonale du parallélipipède qui a pour arêtes les trois forces (fig. 20).

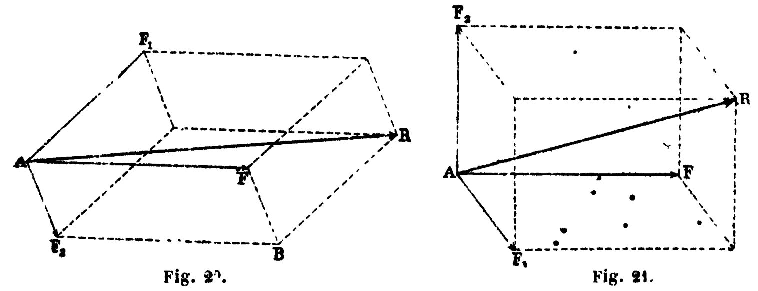


Fig. 20. Fig. 21.

Ce parallélipipède est *rectangle* si les trois forces concourantes sont deux à deux rectangulaires. Dans ce cas $R^2 = F^2 + F_1^2 + F_2^2$ (fig. 21).

Appelons α l'angle de AR et AF, β l'angle de AR et AF_1, γ l'angle de AR et AF_2, on a $F = R \cos \alpha$, $F_1 = R \cos \beta$ et $F_2 = R \cos \gamma$ (1).

18. Conditions d'équilibre. — Des forces concourantes se font équilibre si leur résultante est nulle; alors le polygone des vecteurs représentatifs est fermé, et l'une quelconque des forces est égale et directement opposée à la résultante des autres.

Pour deux forces, la résultante n'est nulle que si les deux forces sont égales et contraires; car, d'après la règle du polygone, on part de A pour revenir en A.

19. Décomposition d'une force. — On peut remplacer une force par plusieurs autres appliquées au même point, car si la force AD peut être substituée aux deux forces AB et AC (fig. 17), inversement AB et AC peuvent remplacer AD.

Tandis que deux forces données n'admettent qu'une résultante, *la décomposition d'une force* AD *est possible d'une infinité de façons.* Il suffit que les deux composantes puissent former un *triangle* avec AD. Chaque composante peut se décomposer à son tour.

Il est utile de décomposer une force dont l'effet ne peut s'exercer que dans une direction déterminée.

20. COMPOSITION DES FORCES PARALLÈLES. — Des forces parallèles, appliquées en divers points d'un corps solide, admettent en général une résultante.

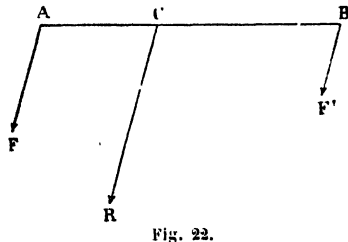


Fig. 22.

Deux forces parallèles de même sens. — On démontre que deux forces parallèles F et F', appliquées en deux points A et B, ont une résultante R de même direction et de même sens, *égale à leur somme.* La direction de la résultante passe entre A et B en un point C qui partage AB en deux segments *inversement proportionnels aux intensités des forces* (fig. 22).

$$R = F + F'; \qquad \text{et } \frac{AC}{BC} = \frac{F'}{F} \text{ ou } AC \times F = BC \times F'.$$

Pour deux forces égales, le point C est au milieu de AB; si la force F est double de F', le segment CA est moitié de CB.

Plusieurs forces parallèles de même sens. — En composant d'abord deux forces F et F_1, on obtient une première résultante partielle R_1; celle-ci composée avec F_2 conduit à une résultante R... (fig. 23).

La résultante générale est égale à la somme de toutes les forces parallèles. Son point d'application O s'appelle **centre des forces parallèles**.

Le point C d'application de la résultante de deux forces parallèles étant donné par la proportion :

$$\frac{AC}{BC} = \frac{F'}{F},$$

(1) α, β, γ ne sont pas indépendants, puisque $\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1$.

la position de ce point ne dépend ni de la direction des forces ni de leur valeur absolue, pourvu que le rapport des intensités ne varie pas.

Les points d'application des résultantes successives jouissent de la même propriété et, par conséquent, aussi le point d'application de la résultante

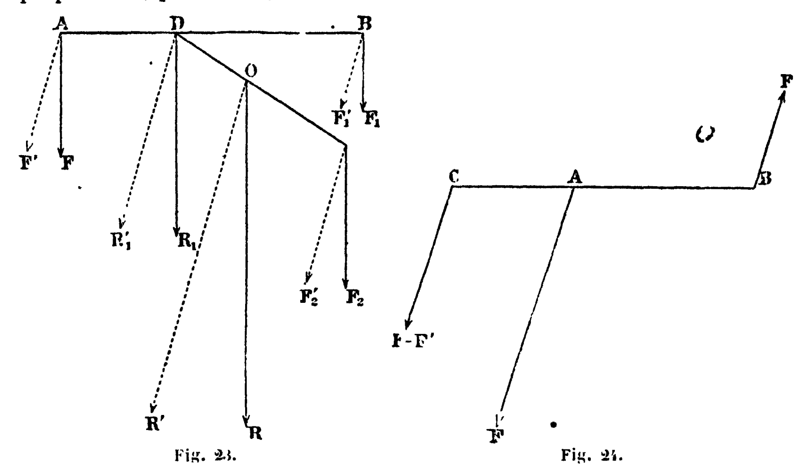


Fig. 23. Fig. 24.

générale. *La position du centre des forces parallèles reste donc la même* quand on fait varier la direction commune des forces (F en F', etc...) (fig. 23) et aussi quand on altère toutes les forces dans un même rapport.

Le *centre de gravité* d'un corps est le centre des forces parallèles qui représentent les poids des particules du corps. Dans un champ magnétique uniforme, les pôles d'un aimant sont des centres de forces parallèles.

21. Deux forces parallèles, de sens contraires. — Les deux forces F et F' (fig. 24), ont une résultante qui leur est parallèle, est *égale à leur différence* et de même sens que la plus grande.

Son point d'application est situé sur le prolongement de AB, du côté de la plus grande, en un point C tel que les distances CA et CB soient *inversement proportionnelles aux intensités des forces* F *et* F'.

$$R = F - F' \quad \text{et} \quad \frac{AC}{BC} = \frac{F'}{F} \quad \text{ou} \quad AC \times F = BC \times F'$$

$$\text{de là} \quad \frac{AC}{BC - AC} = \frac{F'}{F - F'} \quad \text{ou} \quad AC = AB \cdot \frac{F'}{F - F'}$$

22. Couples. — Si les forces F et F' sont peu différentes, la résultante F — F' est petite et son point d'application C s'éloigne sur le prolongement de AB. Pour deux forces égales, la règle est inapplicable.

Un système de deux forces égales, parallèles, dirigées en sens contraires et appliquées en deux points différents d'un

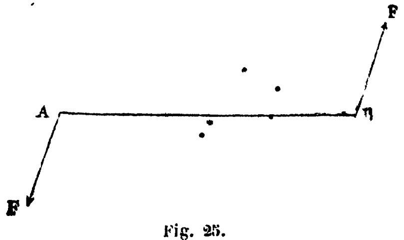


Fig. 25.

corps, porte le nom de *couple* (fig. 25). Le plan des deux forces est le plan du couple.

23. Composition de forces parallèles quelconques. — Si des forces parallèles sont dirigées les unes dans un sens, les autres en sens contraire, on composera d'abord les premières en une résultante R; les autres, composées à part, auront une résultante R′; on composera enfin les deux résultantes de sens contraires R et R′ (fig. 26).

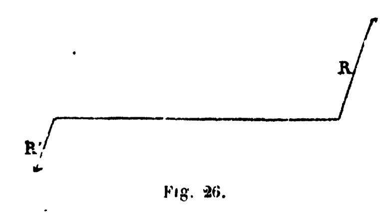


Fig. 26.

Décomposition d'une force en forces parallèles. — Une force peut être décomposée d'une infinité de façons en composantes parallèles. Cela résulte des propositions précédentes.

24. Propositions relatives aux couples. — On appelle **bras de levier** d'un couple la distance des deux forces. Le **moment** d'un couple est le produit de l'intensité de l'une des forces par le bras de levier.

Un couple est caractérisé par le ***plan de ses deux forces,*** par son ***moment*** et par le ***sens de la rotation*** qu'il tend à imprimer.

1° Un couple appliqué à un corps peut être remplacé par un autre couple, situé dans le même plan ou dans un plan parallèle, de même sens et de même moment. Il résulte de là que deux couples, situés dans un même plan ou dans des plans parallèles, se font équilibre s'ils ont des moments égaux et si leurs rotations sont de sens contraires.

2° On démontre que, sur un corps entièrement libre, *un couple ne peut pas être remplacé par une force unique;* un couple n'imprime pas, en effet, comme une force, une translation au corps, mais il le fait tourner autour d'un axe perpendiculaire au plan de ses deux forces jusqu'à ce que la ligne AB des points d'application ait pris la direction des forces; alors les deux forces sont exactement opposées et se font équilibre.

3° Plusieurs couples appliqués à un même corps peuvent être remplacés par un couple unique qu'on appelle **couple résultant**.

RÉDUCTION DES FORCES APPLIQUÉES A UN CORPS SOLIDE

25. Plusieurs forces F, F′, F″,... appliquées en différents points A, B, C..., d'un corps, peuvent être remplacées par **un couple et une force**. La force n'est pas située en général dans le plan du couple.

Pour le démontrer, choisissons arbitrairement un point O du corps, appliquons-y deux forces contraires et égales à F : rien n'est changé puisque ces deux forces se font équilibre. Nous substituons ainsi à la force F, appliquée en A, une force

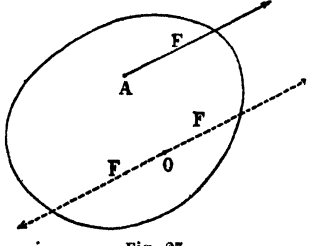


Fig. 27.

égale et parallèle transportée en O, et un couple dont l'une des forces est en A et l'autre en O (fig. 27).

En procédant ainsi successivement pour chaque force, nous obtenons en définitive : 1° des couples en nombre égal à celui des forces; 2° les forces elles-mêmes transportées parallèlement en O.

Les couples peuvent être remplacés par un couple résultant unique (**24**); d'autre part, les forces transportées en O ont une résultante appliquée au même point O. *Toutes les forces appliquées au corps peuvent donc être remplacées par une force et un couple.*

Conditions d'équilibre. — Comme un couple ne peut être remplacé par une force (**24**), les forces appliquées à un corps ne se font équilibre que si la *force* résultante et le *couple* résultant sont *séparément nuls.*

Réduction à une force unique. — En général, le couple et la force se réduisent à une force dans le cas particulier où la force est située dans le plan du couple. Il en est encore ainsi lorsque le couple résultant est nul, par exemple : 1° pour des forces concourantes; 2° pour des forces parallèles dont la composition ne conduit pas à un couple.

PRINCIPES DE LA MÉCANIQUE

On se propose en mécanique de trouver le mouvement d'un corps quand on connaît les forces qui lui sont appliquées, ou de déterminer les forces quand on connaît le mouvement. La solution de ces problèmes est fondée sur plusieurs lois générales ou *principes déduits de l'observation.*

26. PRINCIPE DE L'INERTIE — *Un point matériel ne peut, de lui-même, modifier son état de repos ou de mouvement :* il demeure indéfiniment en repos s'il est en repos ; s'il se meut, il parcourt *une ligne droite* d'un mouvement *uniforme*, sans accélération. Pour que l'état de repos ou de mouvement d'un point vienne à être modifié, il faut une action extérieure qu'on appelle une **force** (**12**). Quand un point matériel est en repos ou en mouvement uniforme, les forces qui agissent sur lui sont nulles ou se font équilibre.

L'inertie dans le repos s'observe aisément. Une bille posée sur un plan horizontal reste en repos. On conçoit *l'inertie dans le mouvement.* Une bille lancée sur un plan horizontal bien dressé prend un mouvement rectiligne. Le mouvement persiste d'autant plus longtemps et est d'autant plus voisin d'être uniforme que la bille et le plan sont mieux polis. On admet que le mouvement se continuerait indéfiniment, sans changement, si le frottement sur le plan et la résistance de l'air étaient nuls.

Un corps ne peut donc avoir un mouvement varié que si une force agit constamment sur lui; une force est encore nécessaire quand le mouvement, bien qu'uniforme, n'est pas rectiligne.

Vitesse à un instant donné. — Si, à un moment donné, la force qui fait varier le mouvement d'un mobile cesse d'agir, le mouvement devient, d'après le principe de l'inertie, *rectiligne et uniforme.* La vitesse cons-

tante de ce mouvement est la vitesse du mobile à l'instant t où la force a cessé d'agir. La vitesse à un instant t, a été définie, pour un mouvement varié quelconque : la vitesse moyenne pendant un temps infiniment court qui précède ou suit le temps t (**2**) ; c'est donc aussi *la vitesse du mouvement uniforme qui succède au mouvement varié* lorsque la force agissante est suspendue à l'instant t.

PRINCIPE DE L'INDÉPENDANCE DES EFFETS DES FORCES. — Ce principe peut se subdiviser en deux parties, suivant qu'il s'agit de forces agissant *successivement* ou de forces *simultanées*.

27. I. Forces successives. — En exerçant une action sur un corps, une force lui imprime une vitesse. D'après le principe de l'inertie, cette vitesse se conserve après l'action de la force. Si une nouvelle force vient à agir sur le corps, son effet est indépendant de la vitesse antérieure, une seconde vitesse s'ajoute à la première et la vitesse ajoutée est la même que si le corps partait du repos.

Prenons un exemple : un corps qui tombe dans l'intérieur d'un wagon en mouvement possède au début de sa chute la vitesse de translation du wagon, il garde cette vitesse à tous les instants de sa chute; si le mouvement du wagon est resté uniforme, le corps rencontre le plancher au même point que si la chute avait eu lieu dans le wagon au repos; d'autre part, la vitesse du mouvement vertical de chute est, à tout instant, la même que si le corps était parti du repos, sans translation.

Dans le cas spécial, où plusieurs forces agissent *successivement* dans une même direction sur un corps, les vitesses qu'elles lui communiquent séparément s'ajoutent. On en déduit la nature du mouvement produit par une force constante.

28. Mouvement produit par une force constante. — *Une force constante engendre un mouvement uniformément varié.*

Soit un mobile A animé d'une vitesse v_0 dans une direction AX (fig. 28); d'après le principe de l'inertie, le mobile devrait conserver cette vitesse; mais, si nous faisons agir sur lui *dans la même direction* une force constante, cette force lui imprime en une seconde une vitesse γ qui est la même que si le mobile était au repos et s'ajoute à la vitesse v_0. Si la

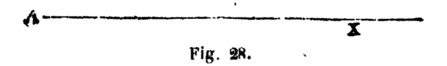


Fig. 28.

force cesse d'agir, le mobile conserve la vitesse $v_0 + \gamma$, mais si la force agit pendant la seconde suivante, elle communique encore au mobile une vitesse γ; la vitesse devient $v_0 + 2\gamma$. Après t secondes, la vitesse sera devenue $v_0 + \gamma t$; le mouvement est donc uniformément varié (**4**).

Réciproquement, un mobile, en mouvement rectiligne uniformément varié, obéit à une force constante qui a la direction du mouvement. En effet : 1° le mobile est soumis à l'action d'une force puisque le mouvement n'est pas uniforme; 2° le mouvement étant rectiligne, la force est dirigée suivant la droite que décrit le mobile, car le mobile changerait

de direction avec la force; 3° la force est constante, car une force variable donnerait au mobile, pendant des temps égaux, des accroissements de vitesse inégaux.

29. II. Forces simultanées. — *Quand plusieurs forces agissent simultanément sur un point matériel, chacune agit comme si elle était seule.* La vitesse résultante est la somme géométrique des vitesses composantes.

Si plusieurs forces constantes agissent dans une même direction sur un point, elles lui communiquent, par unité de temps, une vitesse égale à la somme des vitesses que produirait chacune des forces, car chacune des forces agit comme si elle était seule, et les vitesses s'ajoutent.

En particulier, si une force f communique à un point matériel une accélération j, une force $2f$ lui communiquera une accélération $2j$ et une force nf lui communiquera une accélération nj.

30. Proportionnalité des forces aux accélérations. — Soient une force $F = nf$ et une force $F' = n'f$, $\frac{F}{F'} = \frac{n}{n'}$; or, d'après ce qui précède (**29**), si l'on désigne par j l'accélération due à la force f, les accélérations communiquées par les forces nf et $n'f$ seront $nj = \gamma$ et $n'j = \gamma'$.

Pour un même corps, on a ainsi $\frac{n}{n'} = \frac{\gamma}{\gamma'} = \frac{F}{F'}$.

Masse d'un corps. — L'égalité précédente peut s'écrire $\frac{F}{\gamma} = \frac{F'}{\gamma'}$. Ce *quotient*, constant pour un même corps, s'appelle la *masse m* du corps. Quand une même force agit sur des corps variés, les plus lourds prennent une accélération moindre et leur masse est plus grande. Le nombre m est un *coefficient de résistance au mouvement*.

En écrivant $F = m\gamma$, on représente une force par le produit d'une masse et d'une accélération. Deux corps de même masse prennent la même accélération sous l'action d'une même force constante.

La masse d'un corps ne dépend pas de la nature des forces qu'on fait agir sur lui. Toutefois, pour la comparaison des masses, il est commode de considérer l'action de la pesanteur sur les différents corps.

Les masses sont proportionnelles aux poids. En effet, la pesanteur imprimant, *en un même lieu*, à tous les corps, une même vitesse g par seconde, les poids de deux corps de masses m et m' ou les forces qui les font tomber sont exprimées par : $P = mg$, $P' = m'g$.

$$\text{On a donc} \quad \frac{m}{m'} = \frac{P}{P'}.$$

Deux corps de même poids ont une même masse, quelle que soit leur substance; à un poids double correspond une masse double. Les masses s'additionnent comme les poids. La masse d'un corps est une somme de masses, comme son poids est la somme des poids des particules.

Unité de masse. — On prend pour unité de masse une masse de platine qu'on appelle gramme-masse ou simplement **gramme.** C'est la millième partie de la masse d'un bloc inaltérable de platine iridié, appelé

kilogramme, conservé au Bureau international des Poids et Mesures.

L'unité de masse est la masse de tout corps qui pèse un gramme, c'est la masse d'un centimètre cube d'eau pure à 4° (1). Une masse qui pèse m grammes vaut m unités de masse. La masse d'un corps est, en tout lieu, exprimée par son *poids en grammes*. Une balance mesure le poids d'un corps en grammes ou sa masse.

31. Unité de force. — L'unité de masse étant choisie, l'unité de force en dérive. D'après la relation $F = m\gamma$, l'unité de force est une force constante en grandeur et en direction qui imprime, en une seconde, à l'unité de masse une vitesse de 1 centimètre. Cette unité se nomme **dyne**.

Mesure dynamique d'une force. — D'après $F = m\gamma$, on peut mesurer une force F, en dynes, sans dynamomètre, en la faisant agir sur une masse de m grammes et en déterminant l'accélération γ du mouvement, en centimètres. Par exemple, si la pesanteur communique, dans le vide, à un corps de m grammes, en un lieu déterminé, une accélération g, le poids P de ce corps, en ce lieu, est en dynes $P = mg$. A Paris, $g = 981$ centimètres, le poids d'un gramme vaut 981 dynes.

Un corps qui parcourt une circonférence d'un mouvement uniforme est attiré vers le centre par une force constante, dite *centripète*. Le rayon de la circonférence étant R et la vitesse v ou ωR, l'accélération est $\omega^2 R$ (**10**); si la masse du corps est m, la force qui agit sur lui est $m\omega^2 R$ (2).

Densité. — La masse d'une substance homogène est proportionnelle à son volume. Différentes substances prises sous le même volume ont des masses différentes. La masse de l'unité de volume d'une substance homogène s'appelle sa *densité*. D'après cette définition, la masse d'un corps est égale au produit de son volume par sa densité : $m = vd$.

Pour l'unité de volume d'eau ou un centimètre cube d'eau à 4°, $m = 1$ et $v = 1$, donc, $d = 1$; avec ce choix d'unités (centimètre pour la longueur, gramme pour la masse) la densité de l'eau à 4° est égale à 1.

32. PRINCIPE DE L'ÉGALITÉ DE L'ACTION ET DE LA RÉACTION. — Lorsque deux corps agissent l'un sur l'autre, les choses se passent comme si un ressort tendu était interposé entre eux.

Si un corps A *subit une action d'un corps* A', *il exerce à son tour sur* A' *une réaction égale et contraire*, les actions sont mutuelles.

Dans le cas particulier d'une attraction, A étant mobile et A' fixe, A se rapproche de A'; si A est fixe et A' mobile, A' se rapproche de A; ils s'avancent ensemble l'un vers l'autre s'ils sont tous les deux mobiles. D'après la relation $F = m\gamma$, leurs accélérations respectives sont en raison inverse de leurs masses.

Si un aimant exerce une attraction sur un morceau de fer, celui-ci exerce sur l'aimant une attraction égale.

---

(1) On s'est attaché à rendre la masse du kilogramme étalon rigoureusement égale à la masse d'un décimètre cube d'eau pure à 4°, la différence est négligeable.

(2) En adjoignant aux forces agissantes une force fictive, égale et contraire à leur résultante, on a un ensemble de forces en équilibre. Cette force adjointe est dite *force centrifuge*.

Tout corps pesant posé sur un appui exerce une pression sur cet appui, celui-ci réagit et sa réaction fait équilibre à la pression.

TRAVAIL

Une force n'a d'effet utile que si elle déplace son point d'application. On dit alors qu'elle accomplit un **travail.** Un manœuvre en soulevant un poids, la vapeur en poussant un piston, effectuent des travaux.

DÉPLACEMENT DU POINT D'APPLICATION DANS LA DIRECTION DE LA FORCE

33. **Travail d'une force constante.** — Une force constante étant appliquée en un point A d'un corps, si le déplacement AA′ du point a lieu dans le sens de la force F (fig. 28), on définit le travail T : le *produit*

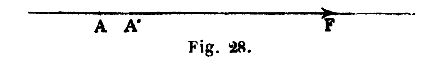


Fig. 28.

de la force par le déplacement e de son point d'application; $T = Fe$.

Le travail est proportionnel à la force et au déplacement du point d'application. *Le temps n'entre pas dans la définition du travail.*

Kilogrammètre. — Le travail pour lequel $Fe = 1$ est l'unité de travail. C'est en particulier le travail accompli par l'unité de force quand son point d'application se déplace de l'unité de longueur. Dans l'industrie mécanique, où l'unité de force est le kilogramme et l'unité de longueur le mètre, l'unité de travail est appelée **kilogrammètre** : c'est le travail nécessaire pour élever un kilogramme-poids à une hauteur d'un mètre. Quel que soit le travail d'une machine, il est comparable à celui d'un poids soulevé et s'évalue en kilogrammètres.

Erg. — Quand l'unité de force est la dyne et l'unité de longueur le centimètre, l'unité de travail est le travail accompli par une dyne lorsque son point d'application parcourt un centimètre dans la direction de la force. Cette unité de travail (dyne-centimètre) est appelée **erg.**

Un kilogramme-poids vaut à Paris 981 000 dynes. Dans $T = Fe$, où T vaut 1 kilogrammètre, $F = 1$ kilogramme et $e = 1$ mètre; si on remplace F par 981 000, e par 100, on a $T = 981\,000\,00$ ou $9,81.\,10^7$, c'est la valeur en ergs du kilogrammètre à Paris. Le kilogrammètre varie comme le kilogramme avec le lieu considéré, l'erg est invariable.

Joule. — En raison de l'extrême petitesse de l'erg, on prend souvent comme unité de travail le **joule** qui vaut 10 millions ou 10^7 ergs. Un kilogrammètre à Paris vaut 9,81 joules.

Travail moteur, travail résistant. — Quand un déplacement a lieu suivant la force, le travail est dit *moteur,* on le compte *positivement.* Le travail d'un poids de P kilogrammes tombant de h mètres est $+ Ph$

kilogrammètres. Un poids d'horloge fournit en tombant un travail positif.

Si le déplacement a lieu en sens inverse de la force (par l'action simultanée d'autres forces ou en raison d'un mouvement antérieurement acquis), le travail de la force est dit ***résistant;*** on le compte ***négativement.*** Une main qui soulève de h mètres un poids d'un kilogramme, effectue un travail $+ Ph$, le travail du poids est $- Ph$ kilogrammètres. En tendant un ressort, le travail de la main est positif, le travail du ressort est négatif.

34. Travail d'une force variable. — Lorsque le point d'application se meut suivant la force, si la force est variable, on décompose l'espace parcouru s, en trajets Δs, $\Delta s'$,... assez petits pour que la force puisse être considérée comme constante sur chacun d'eux; le travail est $F\Delta s$ sur un de ces trajets, $F' \Delta s'$ sur le suivant; le travail total est la somme $F\Delta s + F'\Delta s' + ...$, ou pour abréger : $\Sigma F\Delta s$. C'est par une somme de **travaux élémentaires** qu'on évalue le travail d'un piston de machine.

Puissance. — La puissance est le quotient du travail accompli par le temps employé. Un travail est le produit d'une puissance par un temps.

DÉPLACEMENT DU POINT D'APPLICATION DANS UNE DIRECTION DIFFÉRENTE DE CELLE DE LA FORCE

L'effet utile d'une force est d'autant moindre que la force fait un angle plus grand avec la direction du déplacement.

35. Force constante. — Déplacement rectiligne. — Un point *libre* A se déplace suivant la direction Ax de la *résultante de toutes les forces* qui agissent sur lui. Soit F *l'une* des forces; décomposons-la en deux composantes : Af dans la direction du déplacement, et Af' dans la direction perpendiculaire (fig. 29). La composante normale Af' ne déplace pas le point d'application et ne produit pas de travail. La force n'agit *efficacement* que par sa composante Af et on appelle travail de la force F le travail T de sa composante Af.

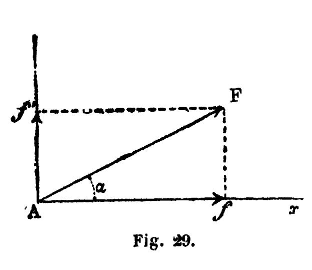


Fig. 29.

e désignant l'espace rectiligne parcouru par le point d'application, et α l'angle de la direction de la force et de la direction du déplacement, $Af = F \cos \alpha$,

$$T = Fe \cos \alpha.$$

Si $\alpha = 0$, $T = Fe$; on retrouve le cas particulier de la première définition (**33**). Tant que α est aigu, la projection de F est dirigée dans le sens du mouvement; le travail est moteur et positif comme le cosinus. Lorsque $\alpha = 90^0$, $\cos \alpha = 0$ et $T = 0$, le travail est nul.

Lorsque α est obtus, la projection de F est dirigée en sens contraire du mouvement; le travail est résistant et négatif comme le cosinus. Lorsque $\alpha = 180^0$, $\cos \alpha = -1$, la force est dirigée en sens inverse du déplacement; $T = - Fe$.

Les *forces motrices* font donc un *angle aigu* et les *forces résistantes* un *angle obtus* avec la direction du déplacement de leur point d'application.

F cos α étant la projection de la force sur la direction du déplacement, le travail est le *produit du déplacement par la projection de la force sur la direction du déplacement.*

c cos α étant la projection du chemin parcouru sur la direction de la force, le travail est aussi le *produit de la force par la projection du chemin parcouru sur la direction de la force* (1).

Trajectoire curviligne. — Soit une force constante, de direction OZ. Décomposons la trajectoire AA′B en éléments assez petits pour que chacun d'eux puisse être considéré comme rectiligne. Le travail de la force, le long d'un élément A′A″, est le produit de la force F par la projection $\alpha'\alpha''$ de A′A″ sur la direction de la force (fig. 30).

Le travail total est la somme : $F(\alpha\alpha' + \alpha'\alpha'' + ...) = F\alpha\beta$; ou le produit de la force par la projection de la trajectoire sur la direction de la force.

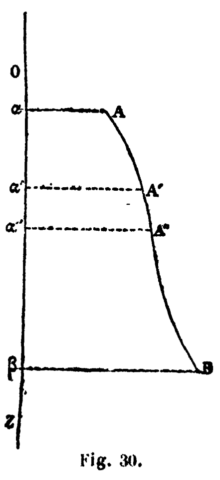


Fig. 30.

D'après cela, le travail d'un poids qui descend sans frottement le long d'un plan incliné ou d'une courbe quelconque est le même au bas de la course que si le poids était tombé verticalement de la même hauteur.

36. Force variable. — Soit un point qui parcourt une trajectoire AB (fig. 31) et est sollicité à chaque instant par une force F variable en intensité et en direction; on appelle travail total de la force F, sur le parcours AB, la somme des travaux élémentaires que l'on obtient en décomposant l'arc parcouru AB en parties infiniment petites, égales ou inégales, qui peuvent être considérées comme rectilignes. La force est sensiblement constante pour chacun des éléments. Le travail élémentaire est F. Mm ou FΔs cos α, α angle des directions de l'élément et de la force. Le travail total sera la somme algébrique des **travaux élémentaires** successifs :

$$\Sigma\, F\Delta s \cos \alpha.$$

La considération du travail a pris une grande importance en permettant d'établir une corrélation d'équivalence entre divers phénomènes.

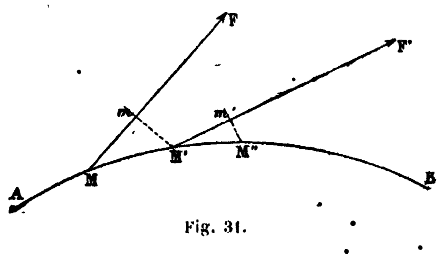


Fig. 31.

(1) Dans le transport horizontal d'un fardeau, la force résistante est un poids vertical; le déplacement étant perpendiculaire à la force, le travail semble nul. Mais le fardeau exerce sur le sol une pression qui détermine des frottements horizontaux pendant le déplacement. Le travail est le produit du déplacement par le frottement. Sans frottement, le travail de déplacement horizontal d'un corps pesant serait nul.

ÉQUIVALENCE DE LA FORCE VIVE ET DU TRAVAIL

On appelle force vive d'un point de masse m, animé d'une vitesse v, le demi-produit de sa masse par le carré de sa vitesse, ou $\frac{1}{2} mv^2$.

37. Relation entre la force vive d'un mobile et le travail dépensé pour lui donner sa vitesse. — Soit un point libre de masse m, partant du repos et soumis à une force constante F, telle que la pesanteur, il prend un mouvement uniformément accéléré; son accélération γ est liée à la force par la relation $F = m\gamma$.

Si, après un temps t, il a parcouru un espace h, le travail de la force F est $Fh = m\gamma h$. Comme d'après les relations $v = \gamma t$ et $h = \frac{1}{2} \gamma t^2$, on a $v^2 = 2\gamma h$ (3),

il en résulte que $Fh = m\gamma h = m\gamma \frac{v^2}{2\gamma} = \frac{1}{2} mv^2$.

Donc un travail Fh donne au mobile une vitesse v et une force vive $\frac{1}{2} mv^2$.

Relation entre la force vive d'une masse et le travail qu'elle peut effectuer en perdant sa vitesse. — Si la force cesse d'agir, la masse poursuit son mouvement avec la vitesse v et sa force vive $\frac{1}{2} mv^2$. Si la masse rencontre alors une résistance constante F, son mouvement est uniformément retardé; après un temps t sa vitesse devient $v' = v - \gamma t$.

La masse s'arrête quand sa vitesse s'est annulée, à un temps $t_1 = \frac{v}{\gamma}$; l'espace qu'elle a parcouru est $h' = v \frac{v}{\gamma} - \gamma \frac{v^2}{2\gamma^2} = \frac{v^2}{2\gamma}$.

Elle a effectué un travail $Fh' = m\gamma \frac{v^2}{2\gamma} = \frac{mv^2}{2} = Fh$.

La masse en mouvement avait une ***capacité de travail,*** puisqu'elle a effectué un travail contre la force F en perdant sa vitesse.

Équivalence d'une force vive et d'un travail. — En disparaissant, un travail a créé une force vive et, à son tour, cette force vive peut reproduire le travail. Il n'y a pas seulement égalité numérique entre une force vive et un travail, il y a ***transformation équivalente.***

A un mobile qui ne part pas du repos, mais possède une vitesse initiale v_0, on donne une vitesse v et on fait passer sa force vive d'une valeur $\frac{1}{2} mv_0^2$ à une valeur $\frac{1}{2} mv^2$, en dépensant un travail Fh donné par

$$\frac{1}{2} mv^2 - \frac{1}{2} mv_0^2 = Fh \text{ (1)}.$$

(1) La vitesse initiale du mobile étant v_0, les équations du mouvement sont :

$$v = v_0 + \gamma t \text{ et } h = v_0 t + \frac{\gamma t^2}{2};$$

de là, $v^2 = v_0^2 + 2\gamma v_0 t + \gamma^2 t^2 = v_0^2 + 2\gamma h$

d'où $v^2 - v_0^2 = 2\gamma h$

et $\frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2} = m\gamma h = Fh$

La variation de la force vive d'une masse pendant un certain temps est égale à un travail dépensé ou effectué pendant le même temps.

Démontrée dans le cas particulier d'une force constante, cette relation d'équivalence *se généralise* en substituant à une force variable une succession de forces constantes dont l'action respective est très courte. De là l'énoncé : *Dans le mouvement que prend un point matériel libre sous l'action de forces quelconques, la variation de sa force vive, d'une de ses positions à une autre, est égale à la somme des travaux des forces qui ont agi sur le point matériel pendant son déplacement.*

38. Théorème général des forces vives. — Lorsqu'un système se déplace sous l'influence de forces quelconques, l'équation des forces vives s'applique à chacun des points isolément. La force qui agit en un point est la résultante des forces extérieures et des forces intérieures ; ces dernières sont les actions mutuelles des points du système.

La somme des équations qui proviennent de tous les points donne le théorème des forces vives pour le système

$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 + \frac{1}{2}m'v'^2 - \frac{1}{2}m'v'^2_0 + \ldots = \frac{1}{2}\Sigma mv^2 - \frac{1}{2}\Sigma mv_0^2 = \mathrm{T};$$

m est la masse d'un point, v_0 et v sont ses vitesses au début et à la fin du déplacement.

D'où l'énoncé : *La variation de la somme des forces vives de tous les points du système, pendant un temps quelconque, est égale à la somme algébrique* T *des travaux de toutes les forces qui ont agi sur les différents points pendant ce temps.*

D'après ce théorème de transformation réciproque, tout système dont la force vive augmente consomme du travail ; le même travail est restitué quand le système éprouve la même diminution de force vive.

Théorème des forces vives pour un solide. — Les forces intérieures sont les actions mutuelles qui maintiennent la rigidité du corps ; dans un déplacement quelconque de l'ensemble du solide, la somme des travaux de ces actions mutuelles est nulle. Par conséquent : *la variation de la force vive d'un solide, pour un déplacement quelconque, est égale à la somme* T_e *des travaux des forces extérieures.*

Solide en translation. — Appelons v la vitesse commune de translation pour tous les points ; m, m', m''... étant les masses de ces points,

on a $\quad mv^2 + m'v^2 + m''v^2 + \ldots = (m + m' + m'' + \ldots)\,v^2 = \mathrm{M}v^2$

d'où $\quad \mathrm{M}v^2 - \mathrm{M}v_0^2 = 2\,\mathrm{T}_e$

Pour un *solide qui tombe* d'une hauteur h, on a : $\mathrm{M}\,(v^2 - v_0^2) = 2\mathrm{M}gh$.

Soit un ***marteau*** de masse M qu'on fait tomber sur un clou ; au moment de son contact avec le clou, il a une vitesse v et une force vive $\frac{1}{2}\mathrm{M}v^2$. La résistance du bois étant F, et e la pénétration du clou, on a $\mathrm{M}v^2 = 2\mathrm{F}e$.

Le marteau peut être un *marteau-pilon,* guidé dans son mouvement par deux glissières, servant à enfoncer des pieux dans le sol et soulevé d'abord par la force élastique d'une vapeur.

Soit encore un *boulet*, de masse m, lancé horizontalement contre un mur. La force motrice est l'expansion d'un gaz. L'intensité moyenne de la force motrice étant F et l la longueur du canon, le travail du gaz est Fl. Ce travail est égal à la force vive acquise par le boulet. En négligeant la résistance de l'air et l'attraction de la pesanteur sur le projectile dans sa course, le boulet possède encore cette force vive en rencontrant le mur. Il y pénètre jusqu'à ce que sa force vive soit épuisée; F' étant la résistance moyenne de l'obstacle, e la pénétration, on a $\frac{1}{2} mv^2 = F'e = Fl$.

Solide en rotation. — Appelons ω la vitesse angulaire d'un solide qui tourne autour d'un axe fixe, les vitesses v, v', v''... des différents points, distants de l'axe de r, r', r''..., sont ωr, $\omega r'$ $\omega r''$...

$$mv^2 + m'v'^2 + m''v''^2 + \text{—} = \omega^2 (mr^2 + m'r'^2 + \text{—}) = \omega^2 \Sigma mr^2.$$

Σmr^2, somme du produit de la masse de chaque point par le carré de sa distance à l'axe s'appelle le *moment d'inertie* du corps par rapport à l'axe de rotation. *La force vive d'un solide en mouvement autour d'un axe est le demi-produit du carré de la vitesse angulaire par le moment d'inertie du solide autour de l'axe.*

Dans le cas d'un cylindre droit, creux et mince, qui tourne uniformément autour de son axe, tous les points sont à une même distance R de l'axe, le moment d'inertie est MR^2, et si, dans l'expression $\omega^2 MR^2$, on remplace ω par $2\pi n$ (pour n tours par seconde), la force vive est $2\pi^2 n^2 MR^2$.

Volant. — Un volant est une roue à circonférence massive qui sert à uniformiser le mouvement d'un arbre moteur sur lequel il est centré.

Lorsque, par un excès T du travail moteur disponible, la vitesse angulaire de l'arbre prend une valeur ω' supérieure à sa vitesse moyenne ω, la force vive du volant augmente, on a : $\frac{1}{2} MR^2(\omega'^2 - \omega^2) = T$ et la différence $\omega'^2 - \omega^2 = \frac{2T}{MR^2}$ est d'autant moindre que MR^2 est plus grand.

Si, au contraire, l'outil que l'arbre commande exécute un travail qui surpasse de T' son travail moyen, la force vive du volant est diminuée de $\frac{1}{2} MR^2 (\omega^2 - \omega''^2) = T'$; alors $\omega^2 - \omega''^2 = \frac{2T'}{MR^2}$.

En définitive, si M et surtout R ont une valeur suffisante, le volant atténue les variations de vitesse en emmagasinant de la force vive quand la vitesse croît et en la restituant quand la vitesse diminue.

ÉNERGIE

39. La capacité de travail d'un système a été appelée énergie : On distingue deux formes d'énergie : *énergie cinétique* et *énergie potentielle.*

Énergie cinétique. — L'énergie cinétique est la force vive d'un corps en mouvement, elle se transforme en travail lorsque le corps en mouvement rencontre un obstacle et perd sa vitesse.

Énergie potentielle. — Un poids P soulevé à une hauteur h possède une capacité de travail Ph égale au travail dépensé pour le soulever. En tombant, il peut servir à soulever un autre poids ou à faire fonctionner un moteur. Par sa *réserve de travail utilisable*, il diffère du même poids P posé sur le sol. Son énergie est dite potentielle.

Un *ressort tendu* possède aussi une énergie potentielle. Si on le laisse se détendre, il peut entraîner des rouages et *produire un travail égal au travail dépensé* pour le tendre. On peut assimiler à un ressort tendu le système formé par la terre et un poids P soulevé à une hauteur h; le travail dépensé pour vaincre l'attraction terrestre en soulevant le poids, ou pour tendre le ressort, est restitué quand le poids retombe.

D'une manière générale, tout système dont certaines parties exigent du travail pour changer de positions relatives, est susceptible d'acquérir de l'énergie potentielle.

Exemples des deux énergies. — L'eau courante, le vent, un projectile en mouvement, un train en marche, le volant d'un moteur en fonctionnement ont de l'énergie cinétique : un ressort tendu, un gaz comprimé, une vapeur en pression, un liquide élevé dans un réservoir ou emmagasiné derrière un barrage, un condensateur électrique chargé, une substance explosible possèdent une énergie potentielle.

Une énergie cinétique est directement convertible en travail mécanique, une énergie potentielle exige pour se transformer un déclanchement déterminé par une intervention étrangère : ouverture d'un robinet pour le liquide d'un réservoir, explosion pour une substance explosible, etc...

Transformation des deux énergies. — Les deux énergies, cinétique et potentielle, peuvent être converties intégralement en travail ; une des deux énergies passe également, et sans perte, d'une forme à l'autre. Par exemple, un poids P maintenu à une hauteur h, a une énergie potentielle Ph, son énergie cinétique est nulle comme sa vitesse. Laissons tomber le poids d'une hauteur h', son énergie potentielle diminue de Ph' et il a pris une force vive ou énergie cinétique $\frac{1}{2} mv'^2 = Ph'$ (**37**). Donc, à la distance $h - h'$ du sol, il possède une énergie potentielle $P(h - h')$ et une force vive $\frac{1}{2} mv'^2$ ou Ph'. A tout instant de sa chute la somme de son énergie potentielle et de son énergie cinétique $P(h - h') + Ph' = Ph$ reste invariable. Il y a, pendant la chute, échange sans perte d'une partie de l'énergie potentielle en énergie cinétique, jusqu'au sol, où la transformation en énergie cinétique est complète, avec $\frac{1}{2} mv^2 = Ph$.

Un corps lancé de bas en haut a au départ une énergie cinétique $\frac{1}{2} mv^2$: en montant, l'énergie cinétique se transforme graduellement en énergie potentielle et à chaque instant du trajet, la somme des deux énergies reste constante et égale à $\frac{1}{2} mv^2$.

Une énergie, soit cinétique, soit potentielle, *se mesure en ergs* comme le travail mécanique équivalent.

MACHINES

40. Pour surmonter une résistance, il peut être avantageux d'interposer entre la force et la résistance un appareil intermédiaire nommé **machine**. Les organes d'une machine transmettent la force à la résistance.

Les organes d'une *machine simple* se réduisent à une seule pièce solide. Une *machine composée* est un ensemble de machines simples associées.

Certaines des machines qui servent à transmettre un travail mécanique ne déterminent qu'un *changement de direction* sans modifier la valeur des facteurs *force et déplacement* du produit F*e* qui représente le travail. C'est le cas de la *poulie.*

D'autres *modifient les facteurs* d'un travail F*e* sans changer le produit. Le *plan incliné*, le *levier,* le *treuil,* la *vis,* appartiennent à ce groupe. Les machines de ce groupe permettent, dans certains cas, de réaliser avec une faible force des travaux qui exigeraient de très grands efforts si on faisait agir directement la force sur le corps qui offre la résistance.

Une machine transforme et utilise un travail, *elle n'en crée pas.* Le travail moteur est égal au travail résistant; ce que l'on gagne en force, *on le perd en chemin parcouru.* Il y a **conservation du travail.**

Nous étudierons la poulie, le levier, le treuil, la vis.

41. POULIE. — Une poulie est un disque circulaire D, mobile autour d'un axe fixe O passant par son centre et perpendiculaire à son plan. L'axe est supporté par une pièce fixe A appelée *chape.* Sur la circonférence du disque est creusé un sillon ou *gorge*, sur lequel est enroulée une corde.

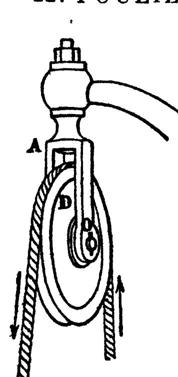


Fig. 32.

A une extrémité de la corde est appliqué un fardeau à soulever, de poids P. A l'autre extrémité on exerce une force égale à P. Si le fardeau est soulevé de *h*, le point d'application de l'effort exercé se déplace également de *h*, le travail moteur P*h* est égal au travail résistant.

La poulie sert à effectuer un travail en changeant la direction de la force sans modifier son intensité. Elle permet d'obtenir une mesure statique d'une force en l'équilibrant par un poids.

42. LEVIER. — Un levier est une barre rigide, mobile autour d'un point fixe et à laquelle sont appliquées deux forces, appelées *puissance* et *résistance.* Les perpendiculaires abaissées du point fixe sur les directions de la puissance et de la résistance sont les *bras du levier.* Nous supposerons que la puissance et la résistance sont deux forces parallèles. D'après la position relative du point fixe et des points d'application des forces, on distingue trois genres de levier.

Premier genre. — *Le point d'appui est compris entre les points d'application des deux forces.* Quand l'équilibre est établi, la résultante R des deux forces P et P′ (**24**) passe par le point d'appui O dont la réaction détruit cette résultante (fig. 33) (1).

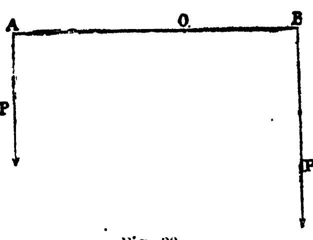


Fig. 33.

La résultante R étant appliquée en O, quand les forces P et P′ se font équilibre, on a, d'après la règle de la décomposition des forces parallèles, la rèlation :

$$P.OA = P'.OB.$$

Si la longueur OA est égale à 10 fois la longueur OB, une force 1 appliquée en A fait équilibre à une force 10 appliquée en B. Le travail de la force P *reste égal* au travail de la force P′. En effet, les forces demeurant tangentes aux arcs décrits, pour un angle ω de rotation autour du point O, le travail de la force P est P.OA.ω, le travail de la force P′ est P′.OB.ω; ces deux travaux sont égaux, puisque P.OA = P′.OB.

Second genre. — *La résistance se trouve entre le point d'appui et la puissance.* Le bras de la puissance étant plus long que le bras de la résistance, ce levier est *favorable à la puissance* qu'il permet de diminuer, il est désavantageux au point de vue du chemin parcouru (2).

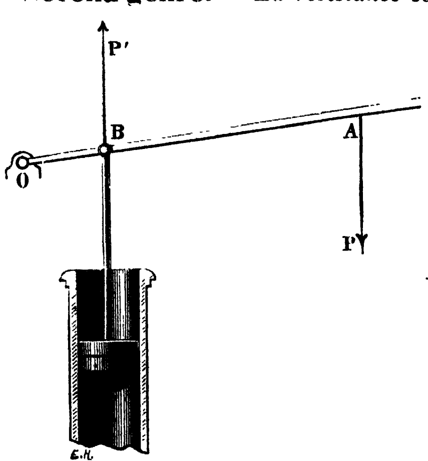


Fig. 34.

Troisième genre. — *La puissance se trouve entre le point d'appui et la résistance.* Ce levier est

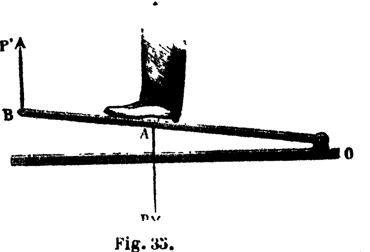


Fig. 35.

(1) Un *fléau de balance* est un levier du premier genre à bras égaux; une balance romaine est un levier du premier genre à bras inégaux. Citons encore comme leviers du premier genre les avirons d'une barque, chacune des branches d'une pince coupante ou d'une paire de ciseaux (la vis est le point d'appui). Un levier du premier genre est utilisé pour soulever une lourde pierre : l'extrémité d'une barre de fer est glissée sous la pierre; à une petite distance, en dehors, est un appui solide, on exerce l'effort sur la longue extrémité. Le ciseau à froid est employé de la même façon.

(2) La brouette est un levier du second genre, l'axe de la roue sert de point d'appui, la résistance est le fardeau posé dans la brouette, la puissance est dans le bras. Chacune des branches d'un casse-noisette sont des leviers du second genre.

Dans les pompes on utilise fréquemment des leviers du second genre (fig. 34).

favorable à la rapidité du mouvement; on gagne en vitesse ce que l'on perd en force (1).

La distinction des leviers en trois genres n'a pas d'importance théorique. *Pour les trois cas,* la condition d'équilibre est P.OA = P'.OB.

43. TREUIL. — Un treuil est formé de deux cylindres solidaires, de même axe, et de rayons différents OA et OB. Ils sont traversés suivant leur axe par un arbre horizontal qui repose sur des coussinets fixes, ils tournent autour de cet axe commun. Le treuil peut servir à élever un poids lourd avec un faible effort (2). Le poids P est soutenu par une corde qui est enroulée sur le petit cylindre et il monte quand on exerce l'effort F sur le pourtour du grand cylindre (fig. 36).

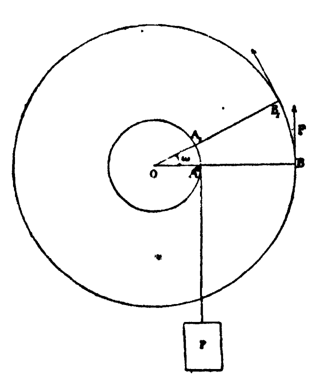


Fig. 36.

Travail moteur F. arc BB_1 = F. ω. OB.

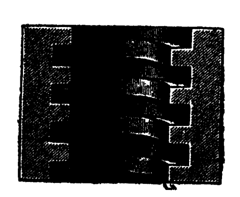
Travail résistant P. arc AA_1 = P. ω. OA.

On a : $F = P. \frac{OA}{OB}$.

Si le rapport $\frac{OA}{OB}$ est égal à $\frac{1}{5}$, on soulève un poids de 20 kilogrammes avec un effort de 4 kilogrammes, mais, comme le *travail moteur* F.OB est égal au *travail résistant* P.OA, le treuil, comme le levier, multiplie la force; mais, comme toujours, il y a conservation de travail.

44. VIS. — Une vis est un noyau cylindrique sur lequel s'enroule en hélice une saillie appelée *filet* (fig. 37). La vis s'engage dans une pièce solide nommée *écrou* (fig. 37 *bis*), creusée d'une rainure qui offre en creux le filet que la vis présente en relief. Si l'écrou est fixe, le mouvement de rotation de la vis dans son écrou est accompagné d'un mouvement de translation suivant son axe. Le déplacement suivant l'axe, à chaque tour de la vis, s'appelle le *pas* de la vis; si la vis tourne d'une fraction de tour, son déplacement suivant l'axe est *proportionnel à l'angle* dont elle a tourné. Cette propriété permet, dans un grand nombre d'instruments de précision, de mesurer de très petites fractions de millimètre (**61**).


Fig. 37.


Fig. 37 *bis*.

(1) La pédale du rémouleur ou de la machine à coudre est un levier du troisième genre (fig. 35); il en est de même de chacune des branches des pincettes de nos foyers.

Dans le corps de l'homme et des animaux, le mécanisme des mouvements a lieu par l'intermédiaire de leviers; le levier du troisième genre est celui que l'on rencontre le plus fréquemment.

(2) Treuil des carriers, treuil des puits.

Dans les pressoirs, la vis est utilisée pour exercer d'énormes pressions. Une résistance R étant appliquée contre sa pointe, la vis effectue un travail Re quand on la fait avancer d'une longueur e égale à son pas, en exerçant une force F tangentielle au pourtour d'un disque de rayon a fixé sur la tête de la vis. Le disque faisant un tour pour le déplacement e de la vis, le travail de la force F est $2\pi a$F et on a R$e = 2\pi a$F. On en déduit $F = \frac{e}{2\pi a} R$. La petitesse de e et la grandeur de a réduisent F.

45. Frottements. — La conservation du travail ne se vérifie rigoureusement qu'avec des machines qui ne présentent pas de réactions ou de *frottements* entre les parties fixes et les parties mobiles (frottement sur l'axe d'une poulie ou d'un treuil, frottement le long d'un plan incliné).

Frottement de glissement. — Le frottement d'une masse pesante tirée sur un plan horizontal est une résistance au glissement; elle est proportionnelle au poids entraîné, et elle diminue quand on lubrifie les surfaces avec un corps gras (1). Les frottements de glissement sont utilisés pour ralentir la marche d'une machine; les freins d'une voiture sont des plaques de fer qu'on amène à frotter contre le pourtour des roues.

Frottement de roulement. — Un cylindre qu'on fait rouler sur un plan horizontal éprouve une résistance au roulement; elle est proportionnelle au poids entraîné, mais elle est plus faible qu'une résistance au glissement et il est avantageux de substituer, quand cela est possible, un frottement de roulement à un frottement de glissement.

Si, par exemple, on diminue le frottement des arbres de transmission en graissant les coussinets sur lesquels ils glissent, on le réduit beaucoup plus en faisant rouler les axes sur une couronne de billes qui sont d'ailleurs légèrement huilées.

(1) Le meilleur graissage se fait par l'huile pour les métaux, par le suif pour le bois.

PHYSIQUE

OBJET DE LA PHYSIQUE

Les phénomènes naturels se divisent en deux groupes : les phénomènes *chimiques* et les phénomènes *physiques*.

46. Modifications chimiques. — Les corps peuvent subir des changements qui altèrent leurs propriétés d'une façon permanente : tel est le cas d'une pierre calcaire qui se transforme en chaux par la calcination ou du plomb fondu qui se change en une poussière jaune d'oxyde de plomb quand on le chauffe au contact de l'air. Ces phénomènes sont dits *chimiques*.

47. Modifications physiques. — D'autres phénomènes, dits *physiques,* se manifestent, sans amener de modification permanente dans la nature des corps; citons le changement de l'eau que la chaleur transforme en vapeur ou encore le changement du verre qu'on électrise par le frottement. Ces modifications laissent intacte la nature du corps et disparaissent avec la cause qui les a produites. L'étude de ces modifications passagères et de leurs lois est l'objet de la physique proprement dite.

Observation; expérimentation. — Deux méthodes font connaître les phénomènes physiques : l'observation et l'expérimentation.

L'*observation* précède l'expérimentation; c'est l'examen attentif et détaillé d'un phénomène et de ses phases, tel qu'il se produit.

L'*expérimentation* s'applique à provoquer la reproduction d'un phénomène spécial pour l'observer à loisir, et à séparer les conditions dans lesquelles il s'accomplit.

Prenons par exemple la recherche de la relation qui existe entre le volume et la pression d'un gaz. Ayant vu que le volume dépend

de la température et de la pression, on fait de l'expérimentation en maintenant *d'abord fixe la température* du gaz et en changeant sa pression, puis on *varie la température* à pression constante.

48. Branches de la physique. — Certains phénomènes physiques paraissent indépendants ; d'autres se rapportent manifestement à une cause commune ou à un même *agent physique*. On a cherché à réduire le nombre des agents physiques et quand un fait nouveau est reconnu, on s'efforce de l'expliquer, c'est-à-dire de le rattacher à d'autres faits bien étudiés. En procédant ainsi, on a distingué un petit nombre de groupes qui constituent les branches de la physique : phénomènes *calorifiques*, phénomènes *sonores*, phènomènes *optiques*, phénomènes *électriques* et *magnétiques*. Quelques-uns de ces groupes se rapportent directement à un sens spécial.

49. Lois physiques. — Dans chacun des groupes, ayant reconnu par l'observation et par l'expérimentation des effets communs à certains corps dans des conditions déterminées, on a formulé des énoncés qui constituent des *lois*. Ex. : *tous les corps sont pesants ; tous les corps s'électrisent par le frottement.* Une loi physique peut résumer une étude d'un phénomène et être exprimée algébriquement ; par exemple : *à une température donnée, la densité d'un gaz est proportionnelle à la pression qu'il supporte.*

Méthode graphique. — La représentation graphique d'une grandeur par une courbe plane est applicable quand cette grandeur a été amenée, dans l'expérimentation, à ne dépendre que d'une variable. Sur l'axe des abscisses on porte les diverses valeurs de la variable (**5**), sur l'axe des ordonnées les valeurs correspondantes de la fonction. La courbe obtenue *rend visible* l'allure du phénomène.

Dans la représentation d'un mouvement (fig. 7), pour obtenir l'espace parcouru après 3 secondes, on lit la hauteur de l'ordonnée élevée au chiffre 3 sur la ligne des abscisses. Inversement on trouve le temps relatif à un espace parcouru en cherchant l'ordonnée égale à cet espace et en lisant l'abscisse correspondante.

50. Théories physiques. Hypothèses. Images. — Pour plusieurs groupes, on a réussi à établir entre les différents phénomènes d'un même groupe un lien qui les rattache à un fait fondamental ; la chute des corps s'explique par une attraction de la terre, qui est un cas particulier de l'attraction universelle. Les phénomènes sonores dépendent de mouvements *vibratoires* faciles à percevoir, qui se propagent dans un milieu élastique. Ces mouvements vibratoires servent de base à la théorie des phénomènes sonores.

La comparaison des phénomènes lumineux et des phénomènes sonores a fait admettre l'*hypothèse* que la lumière doit aussi être attribuée à un mouvement vibratoire. Le milieu élastique nécessaire à la propagation paraissait manquer pour la lumière puisqu'elle se propage dans le vide. On a introduit une *seconde hypothèse,* celle d'un milieu spécial appelé **éther,** susceptible d'entrer en vibration et remplissant les intervalles moléculaires des corps aussi bien que l'espace compris entre les agglomérations qui constituent les astres. Ces hypothèses ont permis d'interpréter simplement les phénomènes lumineux connus et d'en découvrir de nouveaux.

Certains phénomènes électriques s'expliquent aussi, par analogie avec les phénomènes lumineux, par l'hypothèse d'un mouvement *vibratoire électrique.* Ce mouvement vibratoire électrique se propage par l'éther comme le mouvement vibratoire lumineux.

Quand plusieurs hypothèses ont paru pouvoir expliquer le même phénomène, on les conserve jusqu'à ce qu'une expérience ait montré l'impossibilité de l'une d'elles. Ainsi, en optique, la théorie des vibrations a été définitivement préférée à la théorie de l'émission.

A côté des hypothèses on utilise des *images* des phénomènes. La comparaison hydraulique dans l'étude du courant électrique est une image qui facilite l'exposé élémentaire des phénomènes du courant.

Les phénomènes physiques peuvent être considérés comme des *phénomènes de mouvement,* soit du *corps entier,* dans le cas de la chute d'une pierre, soit *de ses molécules* pour le son d'une cloche, soit *de l'éther* en chaleur, en optique et en électricité.

51. Divisions de la physique. — Nous diviserons l'étude de la physique en six parties : 1° Propriétés générales des corps; 2° Pesanteur; 3° Chaleur; 4° Acoustique; 5° Optique; 6° Électricité et magnétisme.

PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES CORPS

Étendue. — La matière est *étendue ;* on entend par là qu'un corps occupe une portion de l'espace, qu'on appelle son *volume.*

Divisibilité. — Un corps peut être divisé en très petits fragments : l'or se réduit en feuilles très minces ; on reconnaît au microscope des corpuscules extrêmement petits ; quelques milligrammes de fuchsine colorent en rouge plusieurs litres d'eau ; la divisibilité des substances odorantes est extraordinairement grande. Une divisibilité beaucoup plus grande a été imaginée en électricité.

Compressibilité. Intervalles moléculaires. — Un corps paraît formé de particules extrêmement petites ou **molécules** offrant les mêmes propriétés que le corps lui-même.

Les molécules ne se touchent pas. En effet, tous les corps se contractent quand on les *comprime* par une action mécanique ou quand on les refroidit, et, comme deux molécules ne peuvent occuper en même temps la même place, cette diminution de volume exige la variation de grandeur d'*intervalles intermoléculaires.* Ces intervalles, invisibles au microscope, sont distincts des lacunes des substances poreuses : pierres filtrantes, sucre, craie, etc.

Élasticité. — Tous les corps sont *élastiques,* c'est-à-dire que, s'ils ont été déformés par une action mécanique, ils tendent à reprendre leur forme quand la cause de déformation cesse d'agir.

L'élasticité des corps peut être mise en jeu par traction, par compression, par torsion, par flexion.

ÉTATS DES CORPS

Les corps de la nature se présentent sous trois états principaux.

52. État solide. — Les solides (bois, marbre, fer, etc.) ont *une forme et un volume déterminés,* et opposent une résistance à un

changement de forme ou de volume. Les *forces de cohésion* qui lient les particules sont considérables, car il faut exercer une traction de près de 100 kilogrammes dans le sens de la longueur pour rompre une tige d'acier de 1 millimètre carré de section.

Un solide soumis à une traction ou à une compression n'éprouve qu'un changement de volume extrêmement faible ; en outre, si l'écart moléculaire dépasse une certaine limite, le solide ne reprend pas son volume primitif ; on dit que la *limite d'élasticité* a été dépassée.

Aux corps appelés vulgairement *élastiques*, tels que le caoutchouc, on peut faire subir une déformation notable sans dépasser leur limite d'élasticité. Les corps *cassants*, au contraire, ne peuvent être déformés d'une façon sensible sans que leur limite d'élasticité soit atteinte et qu'ils se fragmentent. Chez les corps *mous*, des forces faibles déterminent des déformations permanentes (1).

Allongement d'une tige métallique. — Une tige verticale est fixée dans un étau à sa partie supérieure. A la partie inférieure est suspendue une caisse dont on fait varier progressivement le poids P. On mesure au cathétomètre les distances de traits marqués sur la tige avant l'action des poids. Tant que la *limite d'élasticité* n'est pas atteinte, l'allongement λ d'une tige de longueur l et de section s est $\lambda = \frac{1}{E} \cdot \frac{l}{s} P$ (2). Si l'on supprime l'action du poids, la tige se raccourcit de λ. La limite d'élasticité est atteinte quand le fil conserve un allongement permanent après que le poids a été enlevé. Le recuit abaisse la limite d'élasticité.

Torsion d'un fil métallique. — Un fil métallique de longueur l et de rayon r est fixé à son extrémité supérieure ; à l'autre extrémité on applique un couple dont le plan est perpendiculaire au fil. Il y a torsion ; l'angle de torsion est l'angle dont se déplace un point de la circonférence de la base à laquelle est appliqué le couple. L'angle de torsion est $\alpha = \frac{Ml}{\gamma r^4}$; M moment du couple, γ coefficient spécifique.

53. État liquide. — Les liquides *ont un volume déterminé*, comme les solides, mais leurs molécules glissent facilement les unes sur les autres et *ils n'ont pas de forme propre ;* ils se moulent sur les vases qui les reçoivent ; ils se terminent par une *surface libre.*

Les liquides sont *plus compressibles que les solides,* mais ils le sont encore très peu. Ils sont *parfaitement élastiques,* sans limite

(1) Sur un corps *rigide* une force déformante ne produit pas de déformation.

(2) Le *coefficient d'élasticité*, E, est le quotient de la *force déformante* $\frac{P}{s}$ par la *déformation* $\frac{\lambda}{l}$.

d'élasticité ; ils reprennent en effet leur volume initial quand la force qui les comprime n'agit plus.

Compressibilité des liquides. — On nomme compressibilité d'un liquide la diminution de volume de l'unité de volume pour un accroissement de pression d'une atmosphère. Entre 1 atmosphère et 100 atmosphères à 0^0, ce coefficient est 0,000005 pour le mercure, dix fois plus grand pour l'eau. La réaction du liquide ou sa *force élastique* est la pression à laquelle elle fait équilibre. Tant que les pressions sont assez faibles, les diminutions de volume sont proportionnelles aux pressions.

54. État gazeux. — Les gaz *n'ont ni forme ni volume déterminés*, leurs molécules se mélangent et paraissent sans cohésion ; ils sont beaucoup *plus compressibles que les liquides* et leur *élasticité est parfaite* comme celle des liquides. On démontre cette *compressibilité* et cette *élasticité* en engageant un piston en cuir graissé dans un tube épais en verre fermé à l'une de ses extrémités (fig. 38). Quand on enfonce le piston, l'air est comprimé, réduit au dixième de son volume ; il chasse le piston en reprenant son volume. dès qu'on cesse la pression.

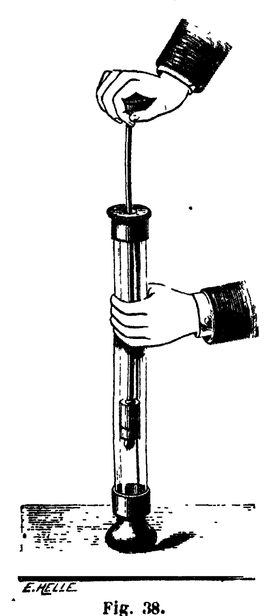


Fig. 38.

Les gaz *n'ont pas de surface libre ;* ils se distinguent des liquides par leur **expansibilité** qui leur fait occuper tout le volume qui leur est offert. Un gaz ressemble à un ressort constamment tendu qui fait effort pour se détendre ; ses molécules exercent contre les parois du vase qui les renferme une pression ou **force élastique**. On montre cette force élastique en plaçant sous la cloche d'une machine pneumatique une vessie gonflée munie d'un robinet ; elle se dégonfle si le robinet est ouvert ; la force élastique de l'air restant fait équilibre à la force élastique de l'air de la cloche (fig. 39). Si, après avoir fermé le robinet,

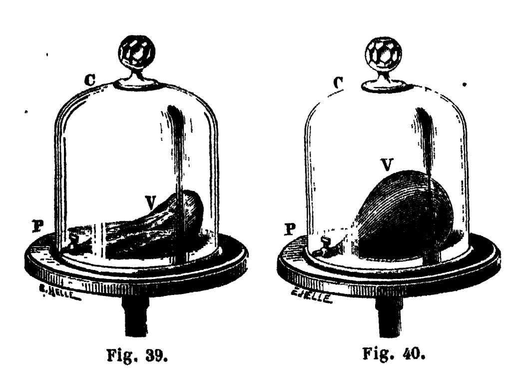


Fig. 39. Fig. 40.

l'on fait progressivement le vide sous la cloche, la vessie se gonfle par l'expansibilité du gaz qu'elle contient (fig. 40). A la rentrée de l'air, la vessie, à robinet fermé, s'affaisse de nouveau.

55. Un même corps, tout en conservant sa nature chimique, peut se présenter sous les trois états : solide, liquide, gazeux. Le soufre solide devient liquide, puis gazeux quand on le chauffe ; l'eau existe à l'état de vapeur dans l'air, devient liquide en se condensant, puis se change en glace quand on la refroidit. L'air lui-même, convenablement refroidi, devient liquide et même solide. Dans ces trois changements, les molécules d'un corps sont inégalement liées.

MESURE DES GRANDEURS

56. La mesure des grandeurs fait suite à l'observation des phénomènes et permet d'en découvrir les lois.

Mesurer une grandeur c'est la comparer à une grandeur fixe de même nature prise pour *unité ;* chaque grandeur a son unité. La mesure est un nombre suivi du nom de l'unité.

Une grandeur n'est rigoureusement *mesurable,* que si on peut définir : 1° deux grandeurs égales, 2° une grandeur double, triple, d'une autre. On choisit ensuite son unité. Un espace, un temps, une vitesse, une force, une quantité d'électricité sont des grandeurs mesurables. Une température n'est pas mesurable, car les degrés qui la repèrent n'ont pas le caractère d'être tous identiques.

Deux grandeurs de même nature sont dans le même rapport que leurs mesures. En effet, si, avec une même unité l, leurs mesures sont n_1 et n_2 on a $L_1 = n_1 l$ pour l'une, $L_2 = n_2 l$ pour l'autre ; d'où

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{n_1}{n_2}.$$

La mesure d'une même grandeur varie en raison inverse des unités qui servent à l'évaluer. Avec une unité l, une grandeur L a pour mesure n; avec une autre unité l', sa mesure est n' ; on a

$$L = nl = n'l'; \quad \frac{n}{n'} = \frac{l'}{l}.$$

MESURE DES LONGUEURS

57. On mesure une longueur *rectiligne* en cherchant combien de fois on peut porter sur cette longueur l'unité de longueur.

L'unité pratique de longueur est le *mètre :* longueur à 0° d'une règle étalon de platine iridié (90 de platine et 10 d'iridium) conservée au Bureau international des Poids et Mesures. Les copies du mètre sont subdivisées en décimètres, le décimètre en centimètres, et le centimètre en millimètres. On ne subdivise pas le millimètre en dixièmes, car les traits se confondraient.

Pour mesurer une longueur, on fait coïncider l'une de ses extrémités avec le zéro d'une règle divisée, et on lit la division à laquelle s'arrête l'autre extrémité M.

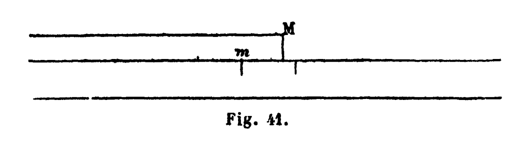


Fig. 41.

Lorsque la longueur à mesurer ne contient pas un nombre exact de millimètres, son extrémité M se place entre deux divisions de la règle (fig. 41) ; on lit la division *m* qui précède l'extrémité M, et on peut évaluer la fraction *m*M en dixièmes de millimètre, avec une erreur inférieure à un dixième de millimètre.

58. Vernier. — L'évaluation en fractions de millimètre s'obtient avec sûreté avec une règle divisée auxiliaire, appelée *vernier.*

Description. — Le vernier est une courte règle divisée, glissant le long de la règle principale. Sur le vernier *au dixième* une longueur CD de 9 millimètres, a été divisée en dix parties, ce qui fait que chacune des divisions du vernier vaut $0^{mm},9$ (fig. 42).

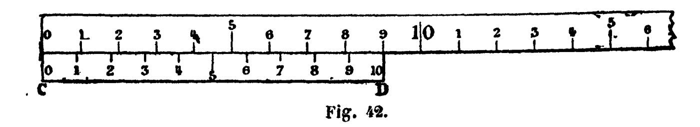


Fig. 42.

Mesure. — Une longueur à mesurer A (fig. 43) occupe *n* divisions d'une règle divisée (ici 32) plus un reste *m*M ; on fait glisser le vernier le long de la règle jusqu'à ce que *son zéro* s'applique contre l'extrémité M de la longueur à mesurer, et on cherche le *trait du vernier* qui *prolonge* un trait de la règle. Ici, la coïncidence a lieu au 7 du vernier. Le 6 du vernier qui précède le 7 pour lequel il y a coïncidence est distant du trait précédent de la règle de $0^{mm},1$, le

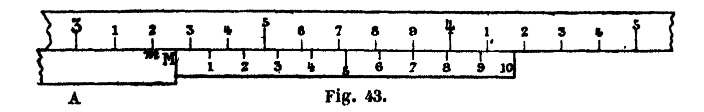


Fig. 43.

5 du vernier qui précède le 7 de 2 divisions est distant du trait précédent de la règle de $0^{mm},2$..., l'extrémité M ou la division 0 du vernier qui précède le 7 de 7 divisions est distante du trait précédent de la règle de $0^{mm},7$. La longueur *m*M vaut donc $0^{mm},7$. Le chiffre de la division du vernier qui est en coïncidence est le nombre de dixièmes de millimètres à ajouter (1).

On apprécie le *cinquantième* de millimètre, en divisant en 50 une longueur de 49 millim. Avec un vernier, on ne va pas plus loin.

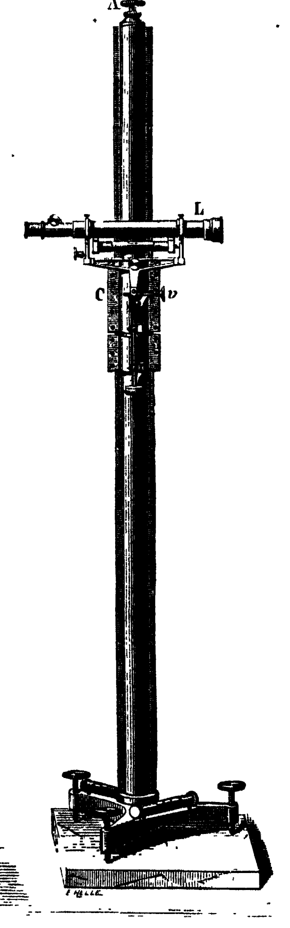


Fig. 44.

59. Cathétomètre. — Le cathétomètre sert à mesurer *la distance verticale de deux plans horizontaux.*

Description. — Il se compose d'une lunette horizontale L, portée par un chariot C qui glisse à frottement le long d'une règle verticale graduée. La règle est fixée à un cylindre creux qui tourne librement autour d'un axe A fixé perpendiculairement à un support horizontal muni de trois vis calantes (fig. 44). Le chariot C peut être arrêté par une vis de pression K en chacun des points de sa course. Un niveau *n* placé au-dessous de la lunette sert à reconnaître l'horizontalité de l'axe optique de la lunette (fig. 45).

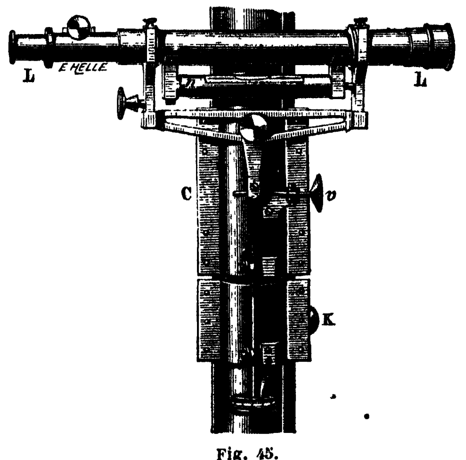


Fig. 45.

(1) S'il n'y a pas coïncidence, on cherche le numéro du vernier le plus voisin d'un trait de la règle ; on ajoute un nombre de dixièmes de millimètre égal à ce numéro.

On établit d'abord la verticalité de l'axe de rotation et de la règle qui lui est parallèle avec les trois vis calantes du support; on rend ensuite horizontal l'axe de la lunette au moyen de son niveau et d'une vis v *qui permet de l'incliner.*

Mesure. — Pour mesurer la différence des niveaux de deux points A et B, on place le cathétomètre à une distance telle que ces deux points puissent être vus avec la lunette.

On fait ensuite glisser le chariot le long de la règle, et on tourne celle-ci autour de l'axe de rotation de façon à viser A, en amenant l'image du point A à coïncider avec la croisée de deux fils très fins tendus à angle droit, à une petite distance de l'oculaire de la lunette; on serre alors la vis K qui fixe le chariot sur la règle.

Une division du bord du chariot fait vernier avec la division de la règle (fig. 46). On lit les millimètres sur la règle, et les fractions de millimètre sur le vernier. De là un premier nombre : 555 $\frac{9}{20}$ sur la figure (le vernier est au vingtième).

On fait glisser verticalement le chariot C qui porte la lunette et on fait tourner au besoin la règle autour de son axe vertical de façon à viser B comme on a visé A. Une lecture donne un deuxième nombre.

La différence des deux nombres représente la différence des niveaux des deux points A et B.

Fig. 46.

MESURE DES ÉPAISSEURS

60. Pied à coulisse. — C'est une règle divisée en millimètres terminée par un talon perpendiculaire fixe. Un curseur, muni également d'un talon, est mobile sur la règle et peut être arrêté par une vis de pression v. Le curseur présente une fenêtre dont l'un des bords, taillé en biseau, est muni d'un vernier au dixième de millimètre. Cet appareil (fig. 47) donne l'épaisseur d'un objet placé entre les bords internes bien plans des deux talons. Les talons étant appliqués l'un

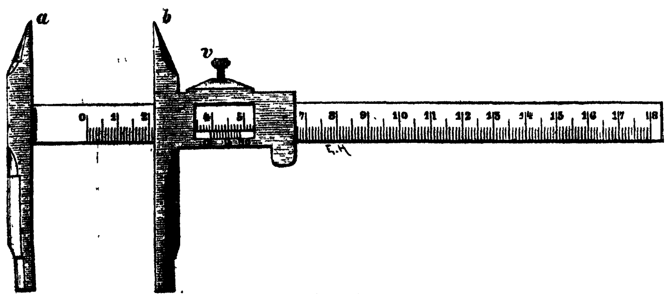


Fig. 47.

contre l'autre, le zéro du vernier coïncide avec le zéro de la règle.

61. Sphéromètre. — Le sphéromètre (fig. 48) est employé pour mesurer l'épaisseur d'une *lame* mince *à faces parallèles*.

Description. — Il consiste en une *vis* à pas régulier (**44**) dont le filet s'engage dans un écrou fixe porté sur un trépied ; le trépied repose par trois pointes sur un plateau de verre dépoli, rigoureusement plan.

L'axe de la vis passe par le centre du cercle circonscrit au triangle équilatéral des pointes. Le corps de la vis se termine inférieurement par une pointe mousse; sa tête porte un large disque gradué qui est perpendiculaire à l'axe de la vis et tourne devant une réglette verticale divisée, fixée sur le trépied; chacune des divisions de la réglette est égale au pas de la vis.

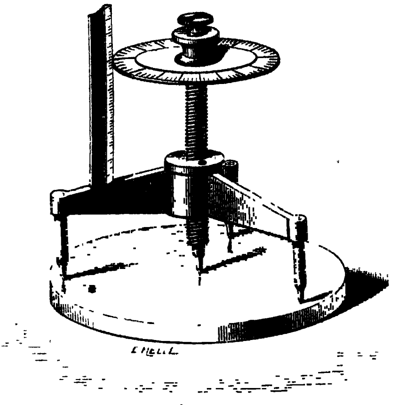


Fig. 48

Avec un pas d'un demi-millimètre, un tour entier du disque déplace la pointe de la vis d'un demi-millimètre. Si le disque porte 500 divisions et tourne d'une division, le déplacement est de $0^{mm},001$ (un *micron*).

Mesure. — On pose le trépied sur le plateau de verre dépoli et on tourne la tête de la vis jusqu'à ce que la pointe touche le plan. Le contact se reconnaît avec précision, car si la pointe dépasse un peu le plan des trois pointes du trépied, l'appareil ballotte autour de la pointe avec un grincement spécial. On remonte un peu la vis jusqu'à supprimer le ballottement. La division de la réglette qui affleure au bord du disque marque le nombre de tours et la division du cercle gradué qui correspond à l'arête de la réglette donne le nombre de fractions de tours.

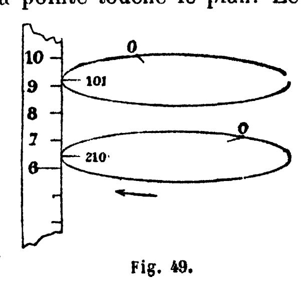


Fig. 49.

Première lecture : Sur la figure 6 tours $\frac{210}{500}$.

Sous la vis relevée, on *glisse la lame* et on établit le contact entre la pointe et la face supérieure de la lame.

Seconde lecture : 9 tours $\frac{101}{500}$. La différence est l'épaisseur : $1^{mm},391$.

Si le pas de vis était inconnu, on l'obtiendrait en faisant une mesure pour une lame d'épaisseur connue.

62. Le **palmer** est appliqué spécialement à la mesure de l'épaisseur des *fils*. L'écrou E dans lequel s'engage la vis est un étrier en fer muni d'un talon ou butoir fixe A, plan à son extrémité. La vis se termine par un butoir identique V, qui peut s'appuyer sur le talon. Des divisions

égales au pas de la vis (1 millimètre) sont tracées transversalement sur une génératrice de la surface extérieure de la tige qui sert d'écrou. La tige de l'écrou est entourée d'un manchon sur le bord inférieur aminci duquel sont gravées 100 divisions parallèles à la tige (fig. 50). Les butoirs V et A étant en contact, les zéros des deux divisions doivent coïncider.

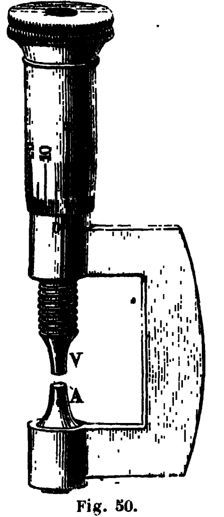


Fig. 50.

Pour obtenir une épaisseur à $0^{mm},01$ près, on interpose l'objet entre les deux butoirs, et par une rotation du manchon, on fait affleurer sans pression la vis sur l'objet. On lit alors les millimètres sur la règle de la tige et les fractions de millimètre sur la graduation circulaire du manchon.

MESURE DES SURFACES

64. L'unité de surface dépend de l'unité de longueur; c'est le *centimètre carré* ou la surface d'un carré qui a un centimètre de côté.

Pour des surfaces à contour *géométrique,* triangle, parallélogramme, rectangle, trapèze, cercle, sphère, la surface se déduit d'une mesure de longueurs et d'un calcul par une formule établie.

Pour une surface *non géométrique,* on peut découper suivant le contour de la surface une feuille de papier homogène et la peser. On pèse une feuille du même papier de surface connue par sa forme géométrique. Le rapport des poids est le rapport des surfaces.

On peut encore découper suivant le contour de la surface une feuille de papier *quadrillé* en petits carrés égaux de surface connue et compter le nombre de carrés entourés par le contour.

MESURE DES VOLUMES

65. L'unité de volume dépend de l'unité de longueur; c'est le *centimètre cube*, ou un cube dont l'arête a pour longueur un centimètre.

Dans le cas de volumes de forme *géométrique,* prisme, pyramide, cylindre, sphère, le volume se déduit d'une mesure de longueur et d'un calcul par une formule.

Pour un *solide non géométrique*, on se sert d'un vase gradué pouvant contenir le corps et renfermant un liquide. On y plonge le corps, le volume du solide se mesure par la lecture des deux affleurements du liquide.

Un *liquide* se verse directement dans le vase gradué. Le volume d'un *gaz* se mesure en faisant passer le gaz dans une éprouvette graduée.

MESURE DES ANGLES

66. L'unité d'angle est le **radian**, *angle au centre* qui intercepte sur

une circonférence d'un rayon de 1 centimètre un arc égal à 1 centimètre. Un angle qui intercepte un arc α sur une circonférence de rayon 1 a pour mesure cet arc α. Si l'arc intercepté est une demi-circonférence, l'angle au centre correspondant vaut 3,1416 radians.

Habituellement on divise la circonférence en 360 parties égales, appelées **degrés**. Le degré se subdivise en 60 minutes, la minute en 60 secondes. Les angles s'évaluent en degrés et subdivisions du degré. La valeur du radian en degrés, minutes et secondes est $\frac{360}{2\pi}$ ou $57^{\circ}17'44''$.

Pour mesurer un angle sur le papier, on fait usage d'un **rapporteur**, demi-cercle dont la circonférence est divisée en 180 degrés. Chaque arc d'un degré correspond à un angle au centre d'un degré. On applique le centre du rapporteur, marqué par une encoche, sur le sommet de l'angle à mesurer; on fait coïncider l'un des côtés de l'angle avec le rayon OX (fig. 51) du zéro, puis on lit l'arc compris entre les côtés OX et OA de l'angle.

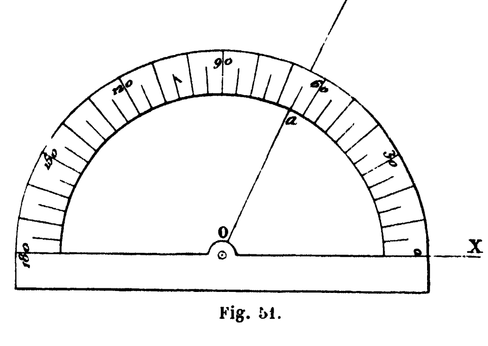


Fig. 51.

Les mesures de précision se font avec des **goniomètres**.

Un goniomètre se compose d'un cercle divisé sur sa circonférence en *demi-degrés*. Sur cette division se déplace une *alidade* A ou rayon mobile autour d'un axe perpendiculaire au cercle et passant par son centre (fig. 52).

Un angle COD se mesure par la course de l'alidade A, quand elle passe d'une 1re position parallèle à OC à une 2e position parallèle à OD.

L'alidade A porte (fig. 53) un *vernier* circulaire V centré sur la circonférence divisée, et sur lequel 29 divisions de la circonférence sont partagées en 30 parties égales.

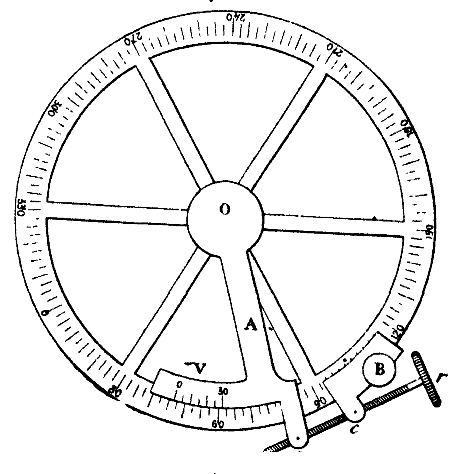


Fig. 52.

Une mesure correspondant à une position de l'alidade se fait : 1° en notant la division du cercle qui précède immédiatement le zéro du vernier; 2° en ajoutant le numéro du trait coïncidant du vernier. Le premier

nombre donne les demi-degrés, le second donne les minutes. (Sur la figure 53 on lit 41 degrés 46 minutes.)

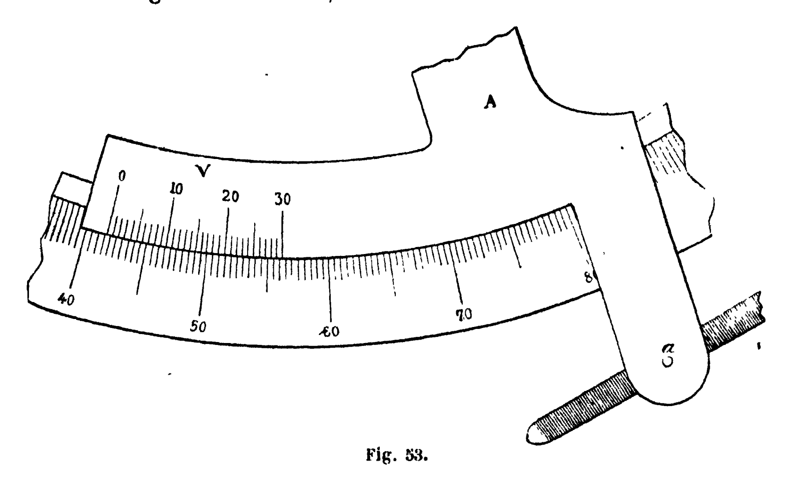


Fig. 53.

On mesure les très petits angles par une méthode optique (**448**).

MESURE DES TEMPS

67. L'unité de temps est la *seconde* ou 86400e partie du jour moyen. Le *jour moyen* est le temps qui sépare deux passages consécutifs du soleil moyen au méridien. Les instruments qui mesurent le temps sont : les *horloges* et les *chronomètres* (**85**), qui battent la seconde ; les *diapasons* (**396**), qui apprécient les petites fractions de seconde.

La mesure de la durée d'un phénomène en secondes et fractions de seconde se fait avec des *chronographes inscripteurs*. On munit d'un style l'une des branches d'un diapason ; ce style trace une courbe sinusoïdale sur un cylindre tournant ; on compte le nombre de sinuosités comprises entre le commencement et la fin du phénomène.

PESANTEUR

68. Tous les corps sont pesants. — A la surface de la terre, tout corps *tombe,* c'est-à-dire se dirige vers le sol, quand il n'est pas soutenu. C'est un phénomène vulgaire pour les solides et pour les liquides; nous verrons que les gaz ne font pas exception (**144**). On appelle *pesanteur* la cause de la chute des corps.

Si on divise un corps en parties de plus en plus petites, chacune des parties est pesante. La pesanteur est donc appliquée aux particules de tous les corps; nous allons chercher sa direction et son intensité.

76. Direction de la pesanteur. Fil à plomb. — La direction de la pesanteur est la ligne que suit un corps pesant qui tombe librement. Cette direction, appelée **verticale,** est encore donnée par le *fil à plomb.*

Un *fil à plomb* est un fil flexible F, suspendu à un point fixe par une de ses extrémités et portant à l'autre extrémité un corps pesant tel qu'une balle de plomb (fig. 54). A cause de sa flexibilité, le fil se tend suivant la direction de l'effort exercé par le plomb.

Plusieurs fils voisins terminés par différents corps sont parallèles au repos; la direction de la pesanteur est donc *la même en un même lieu* pour tous les corps, quelles que soient leur forme et leur nature.

F

P

Fig. 54.

La direction de la verticale est perpendiculaire à la surface d'un liquide en repos.

Pour le vérifier, on suspend un fil à plomb au-dessus d'un vase plein d'eau en y faisant plonger la balle de plomb. Une équerre à dessin, appliquée contre le fil par un côté de son angle droit, suit la surface de l'eau tout le long de son autre côté, quel que soit le

plan vertical dans lequel on le place (fig. 55). Le fil est donc perpendiculaire à la surface de l'eau.

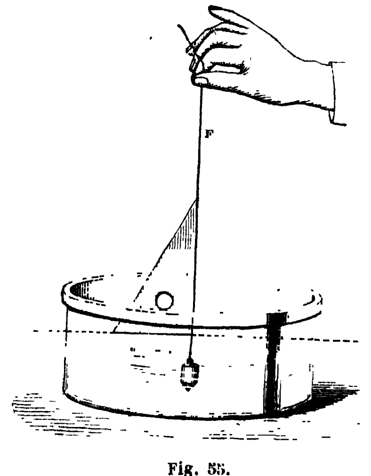


Fig. 55.

Le fil à plomb sert en maçonnerie à vérifier la verticalité d'un mur ou l'horizontalité d'une ligne sur un plan. Dans le premier cas, le fil doit être parallèle au mur sur toute sa longueur. Dans le second cas, le fil à plomb est fixé à une double équerre (*niveau des maçons*) que l'on pose sur la ligne. Si la ligne est horizontale, le fil couvre une rainure tracée au milieu de l'appareil.

Plan horizontal. — On appelle *plan horizontal* un plan perpendiculaire à la verticale, et *horizontale* toute droite située dans ce plan ou parallèle à ce plan.

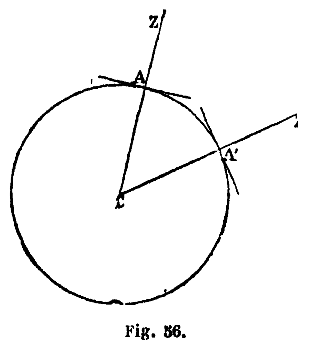


Fig. 56.

La pesanteur est dirigée vers le centre de la Terre. — La surface des eaux du globe terrestre est sensiblement sphérique ; en chaque lieu, elle forme un plan horizontal tangent à la sphère : les verticales, en des points éloignés, sont perpendiculaires aux plans tangents de la sphère en ces points et dirigées suivant des rayons (fig. 56). En tout lieu du globe, la pesanteur est donc dirigée vers le centre de la Terre.

La verticale de Paris fait un angle de 48° 50′ avec la verticale d'un point de l'Équateur situé sur le même méridien : l'angle des verticales de Paris et de Barcelone est supérieur à 7° ; deux fils à plomb distants d'un kilomètre font entre eux un angle d'un peu plus d'une demi-minute (1), mais dans un espace restreint deux fils à plomb sont parallèles et leur angle échappe à toute mesure.

(1) Le *mille marin* est la distance de deux points de la surface des eaux dont les verticales font entre elles un angle d'une minute ; le mille marin vaut 1852 mètres ; un navire est dit filer 20 nœuds s'il parcourt 20 milles à l'heure.

69. Poids d'un corps. — Un corps pesant est formé de molécules matérielles sollicitées chacune par une force dirigée suivant la verticale du lieu ; ces forces, parallèles et de même sens, ont une résultante unique, verticale, égale à leur somme, appelée *poids* du corps. *Le poids d'un corps est la résultante des actions exercées par la pesanteur sur tous les points du corps.* On a pris pour **unité de poids** le poids d'un gramme ou la millième partie du poids du *kilogramme* étalon de platine iridié (**30**). Ce poids est très sensiblement le poids d'un centimètre cube d'eau pure à 4°.

70. Centre de gravité. — Le point d'application G de la résultante des effets de la pesanteur sur les particules d'un corps est appelé *centre de gravité* (fig. 57). Dans les problèmes où la pesanteur intervient, on peut remplacer toutes ces forces par *une seule :* le poids du corps appliqué au centre de gravité.

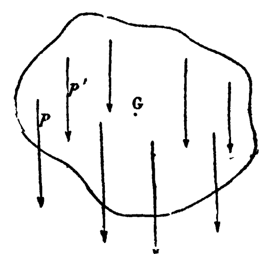


Fig. 57.

Quand on déplace un corps, l'action de la pesanteur sur ses particules ne change pas. Si la forme du corps est fixe ainsi que la distribution de sa matière, le centre de gravité conserve la même position dans le corps, car un centre de forces parallèles ne varie pas quand les forces partielles changent de direction sans changer de grandeur ni de points d'application (**20**).

Si l'intensité de la pesanteur varie, ce qui arrive lorsque le corps est porté dans un lieu différent, toutes les forces parallèles sont altérées dans le même rapport et le centre de gravité conserve encore la même position (**20**).

Détermination géométrique d'un centre de gravité. — Des corps homogènes de mêmes formes et de substances différentes ont leurs centres de gravité semblablement placés.

Quand un corps homogène présente un *centre de symétrie,* ce point est le centre de gravité ; en effet, le corps peut alors être décomposé en groupes de deux masses égales m et m', m_1 et m'_1... également distantes de ce point et sollicitées par des forces égales qui se composent en une seule appliquée en ce point (fig. 58). D'après cela, le centre de gravité

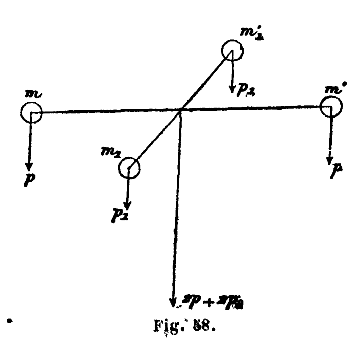


Fig. 58.

d'une sphère est son centre ; pour un cylindre à base circulaire c'est le milieu de la droite qui joint les centres des deux bases ; pour un parallélipipède, c'est le point de concours des diagonales.

Une surface, une ligne pesante ont un centre de gravité. Dans un cercle, le centre de gravité est le centre ; dans un rectangle, il est le point de concours des diagonales.

Le centre de gravité, comme le poids d'un corps, n'a pas une existence propre ; ce qui existe, ce sont les poids appliqués aux particules. Mais comme on annule l'action de plusieurs forces en contre-balançant l'action de leur résultante, on fera équilibre à tous les poids partiels en appliquant au corps, de bas en haut, une force égale à leur somme et passant par le centre de gravité.

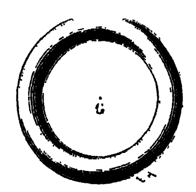


Fig. 59.

Lorsque le centre de gravité d'un corps ne fait pas partie de la masse du corps, comme dans un tube, une sphère creuse ou un anneau (fig. 59), il faut que ce point soit relié au corps pour que la force qu'on y suppose appliquée agisse comme l'ensemble des poids des particules.

Détermination expérimentale d'un centre de gravité. — *Un corps pesant est en équilibre si son centre de gravité est soutenu.* On déduit de là une détermination physique du centre de gravité d'un corps de forme quelconque.

Quand on suspend le corps par un de ses points A à l'extrémité d'un fil flexible, le poids du corps est annulé si la verticale du centre de gravité passe par le point de suspension B ; le centre de gravité G se place donc sur le prolongement du fil. Il en est de même si l'on soutient le corps par un autre point C. Le centre de gravité se trouve à l'intersection des deux directions AB, CD (fig. 60).

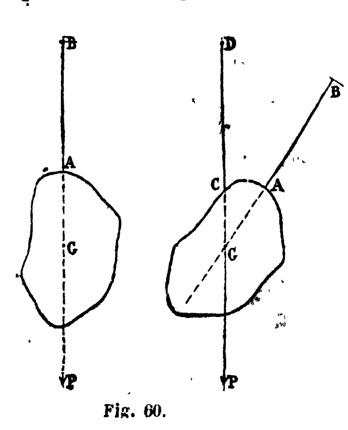


Fig. 60.

71. Équilibre d'un corps solide mobile autour d'un axe horizontal. — Il faut, pour l'équilibre, que le centre de gravité soit soutenu, ou *que la verticale menée en ce point passe par l'axe fixe.*

Cet équilibre a trois manières d'être : 1° Il est *stable* lorsque le centre de gravité G est au-dessous de l'axe O (fig. 61) ; le corps écarté un peu de sa position d'équilibre *y est ramené* par son poids, le centre de gravité tendant à descendre.

2° Il est *instable* lorsque le centre de gravité est au-dessus de l'axe (fig. 62); dans ce cas, le corps un tant soit peu dérangé de sa position d'équilibre, *s'en éloigne sans retour* par l'action de son poids, car le centre de gravité ne peut remonter de lui-même.

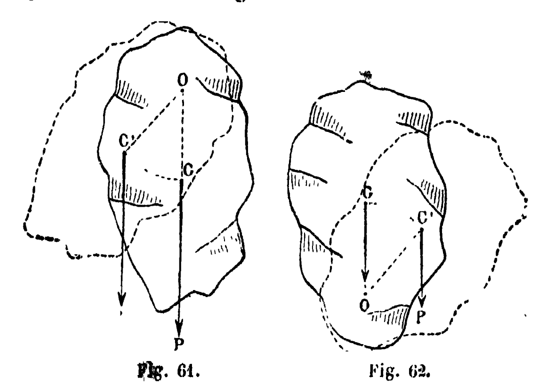


Fig. 61. Fig. 62.

3° Il est *indifférent* lorsque l'axe passe par le centre de gravité, le poids du corps étant annulé dans toutes les positions par la résistance de l'axe.

Équilibre d'un corps solide reposant sur un plan résistant horizontal. — S'il n'y a qu'un point de contact avec le plan, il faut pour l'équilibre que la verticale menée par le centre de gravité rencontre le plan horizontal au point d'appui.

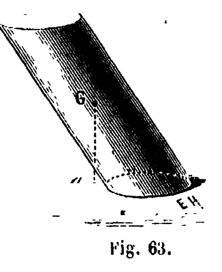


Fig. 63.

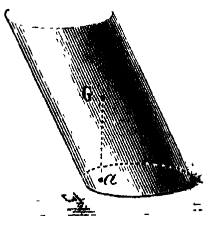


Fig. 64.

Si le corps solide repose sur un plan horizontal par un certain nombre de points, l'équilibre exige que la verticale menée par le centre de gravité tombe à l'intérieur du *polygone* convexe formé en réunissant les points d'appui (fig. 63).

L'équilibre est d'autant plus stable que ce **polygone de sustentation** est plus étendu et que le centre de gravité est plus bas.

Si la verticale du centre de gravité vient à rencontrer le plan d'appui en *a*, en dehors du *polygone de sustentation* (fig. 64), le corps tombe du côté où le pied de la verticale rencontre le plan.

Ces remarques trouvent leur application dans l'équilibre du corps humain pendant la locomotion, dans le chargement des voitures, dans la stabilité des navires, etc.

LOIS DE LA CHUTE DES CORPS

72. Première loi. — *En un même lieu, tous les corps tombent également vite.*

Deuxième loi. — Loi des espaces. — *Les espaces parcourus par un corps qui tombe librement, en partant du repos, sont proportionnels aux carrés des temps employés à les parcourir.*

Troisième loi. — Loi des vitesses. — *Les vitesses acquises par un corps qui tombe librement, en partant du repos, sont proportionnelles aux temps écoulés depuis le début de la chute.*

Les énoncés précédents sont relatifs à la chute **dans le vide.** Les deux dernières lois caractérisent un *mouvement uniformément accéléré.* Elles ne sont pas distinctes, car l'une est la conséquence de l'autre (**4**). Elles sont exprimées par les équations

$$e = \frac{1}{2}gt^2, \qquad v = gt.$$

L'accroissement constant de vitesse par seconde ou l'**accélération** g est le double de l'espace parcouru pendant la première seconde de chute. A Paris, g est égal à 981 centimètres.

$v = \sqrt{2ge}$ est la vitesse acquise par un corps qui tombe d'une hauteur e dans le vide, sans vitesse initiale : elle est proportionnelle à la racine carrée de la hauteur de chute (**3**).

Nous savions déjà que le poids d'un corps est une force *constante en direction* en un lieu déterminé. De ce que le mouvement est uniformément accéléré, il résulte que le poids d'un corps est une *force constante en grandeur* pendant la durée de la chute (**28**).

On démontre encore que le poids d'un corps est une force continue et constante en suspendant ce corps à un dynamomètre : la flexion persiste et reste constante.

VÉRIFICATIONS EXPÉRIMENTALES

73. Première loi. **Chute dans le vide.** — Des corps de natures et de formes diverses tombent inégalement vite dans l'air; la différence est manifeste pour une balle de plomb et une feuille d'or. Ces inégalités dans la durée proviennent de la résistance de l'air.

On montre que tous les corps tombent également vite dans le vide avec un grand tube cylindrique en verre ayant environ 2 mètres de hauteur et 7 à 8 centimètres de diamètre (fig. 65); ce tube est terminé à ses deux extrémités par deux garnitures métalliques dont l'une se prolonge par un robinet que l'on peut visser sur une machine pneumatique. On a introduit dans le tube différents corps : balle de plomb, morceau de liège, feuille d'or, barbe de plume. Après avoir fait le vide, on retourne brusquement le tube; tous les corps tombent et arrivent en même temps à l'extrémité inférieure. En laissant rentrer un peu d'air et en retournant le tube, les corps légers sont en retard et d'autant plus qu'on a laissé rentrer l'air plus complètement.

Le retard dû à la résistance de l'air peut être mis en évidence sans appareil spécial. Sur un disque de métal ayant le diamètre d'une pièce de cinq francs en argent on pose un disque de papier un peu moins large. Tenant alors le disque horizontalement, métal en dessous, on le laisse tomber à plat, d'une certaine hauteur, le métal ouvre le passage au papier et le soustrait à la résistance de l'air. Le papier tombe comme dans le vide, aussi vite que le métal.

La *chute des liquides* est également modifiée par la présence de l'air, on le démontre avec le **marteau d'eau.** C'est un tube de verre rempli d'eau aux deux tiers; après avoir fait bouillir l'eau pendant quelques instants pour chasser l'air, on a fermé le tube à la lampe. En retournant brusquement le tube, l'eau tombe *en bloc* et choque le fond avec le bruit sec d'un coup de marteau. Dans l'air, le liquide serait tombé en se divisant en gouttelettes par l'interposition de particules d'air.

Fig. 65.

Tous les corps tombant en un même lieu dans le vide avec la même vitesse, les lois du mouvement de la chute peuvent être étudiées avec un corps quelconque. A cause de la difficulté d'opérer dans le vide, on opère dans l'air, mais dans des conditions où la résistance de l'air n'a pas d'effet appréciable.

74. Deuxième loi. **Loi des espaces.** — La rapidité croissante de la chute rend difficile l'observation précise de l'espace parcouru, car une petite erreur dans le temps entraîne une erreur notable pour l'espace. On s'est proposé de *ralentir* le mouvement sans changer la loi; le ralentissement facilite les observations, en outre la diminution de la vitesse réduit la résistance de l'air.

75. Plan incliné de Galilée. — Galilée employait un plan incliné le long duquel la chute avait lieu. Le frottement est rendu très faible avec une bille M qu'on laisse rouler sur le plan.

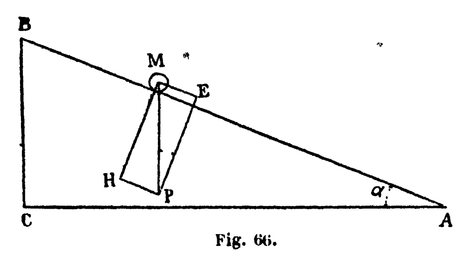


Fig. 66.

Coupons le plan incliné par un plan perpendiculaire à son intersection avec le plan horizontal (fig. 66). L'angle BAC est l'angle plan du dièdre formé par le plan incliné avec le plan horizontal, BA est la *ligne de plus grande pente* (perpendiculaire aux horizontales du plan). Le poids MP de la bille peut être décomposé en deux forces MH et ME, l'une perpendiculaire et l'autre parallèle à BA.

L'effet de la composante MH étant annulé par la résistance du plan. la composante ME fait seule descendre la masse.

Les triangles MPE, BAC ayant leurs angles égaux sont semblables ; on a donc

$$\frac{ME}{MP} = \frac{BC}{BA} \qquad \text{d'où} \qquad ME = MP\frac{h}{l} = MP \sin\alpha \text{ (1)};$$

h représente la hauteur BC et l la longueur BA du plan.

La composante efficace ME est *constante* comme le poids MP. Le mouvement est ralenti quand ME diminue, or ME est une fraction de MP d'autant plus petite que l'angle BAC ou α est plus faible.

Si la longueur AB est divisée en 16 parties égales, les espaces parcourus sont 1, 4, 9, 16, pour des temps 1, 2, 3, 4 ; les espaces sont donc *proportionnels aux carrés des temps*.

m étant la masse de la bille, en chute libre, $MP = mg$; l'accélération sur le plan étant γ, on a $ME = m\gamma = mg\frac{h}{l}$; d'où $g = \frac{l}{h}\gamma$.

76. Machine d'Atwood. — En chute libre, la force qui entraîne la masse d'un corps est son poids. Dans la machine d'Atwood, la force agissante est un poids *constant* comme en chute libre, mais

(1) Un plan incliné est une *machine simple* qui permet de soulever facilement un poids. L'effort constant ME qu'il faut exercer pour faire monter le corps le long d'un plan incliné est inférieur au poids MP. Le travail dépensé dans le déplacement, de A à B, est $ME \times l$, ou $MP \times h$. Le travail est donc le même que si l'on soulevait le corps verticalement ; il y a *conservation du travail*. Les routes en pente douce et en lacets forment des plans inclinés qui ne diminuent pas le travail total, mais le travail par seconde dans les montées.

on réduit son effet en lui faisant *entraîner, outre sa masse, une autre masse beaucoup plus considérable.*

La machine d'Atwood se compose d'une colonne au sommet de laquelle est disposée une poulie très légère R, à gorge creuse, mobile autour d'un axe horizontal. Sur la poulie s'enroule un fil de soie très fin supportant à ses extrémités deux masses égales M (fig. 67). Le poids du fil étant négligeable, les poids des deux masses se font équilibre dans toutes les positions du fil. Mais si l'on charge l'une des masses d'une masse additionnelle *m*, le poids de cette masse entraîne le système. En chute libre, ce poids n'en-

Fig. 67.

Fig. 68.

Fig. 69.

traînerait que sa propre masse *m*, ici il entraîne 2 M + *m*.

Marche des expériences. — La masse descend parallèlement à une règle verticale divisée en centimètres, le long de laquelle un curseur métallique plein C se fixe, à diverses hauteurs, avec une vis de pression (fig. 68). Une horloge à secondes H munie d'un cadran sert à compter le temps (fig. 69).

Tout d'abord, la masse M + *m* a été remontée et sa base inférieure est maintenue en face du zéro de la règle divisée. Par une disposition spéciale, le système M + *m* cesse d'être soutenu au moment où le battement de l'horloge marque le commencement de la seconde du zéro du cadran. En tâtonnant, on place le curseur en un point de la règle tel qu'on entende *simultanément* le battement de l'horloge commençant la deuxième seconde et le choc de la masse sur le curseur plein.

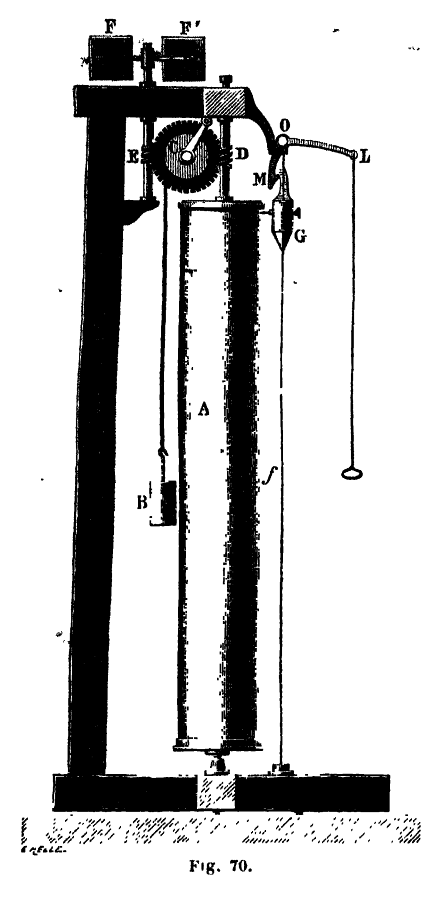


Fig. 70.

On ramène le système M + *m* au zéro, on recommence, et on cherche à quelle division il faut placer le curseur pour que le poids le frappe après deux secondes de chute.

On mesure ainsi les espaces *e* parcourus en 1, 2, 3, 4 secondes.

Si l'espace *e* parcouru après une seconde est 10 centimètres :

$$e_1 = 10, \quad e_2 = 10.4,$$
$$e_3 = 10.9, \quad e_4 = 10.16$$

Les espaces parcourus sont *proportionnels aux carrés des temps*.

77. Appareil Morin. — L'appareil du général Morin est un appareil enregistreur (fig. 70).

Description. — Il se compose d'un cylindre de bois A de 2 mètres environ de hauteur, rendu vertical à l'aide de vis calantes et recevant d'un mécanisme d'horlogerie (1) un mouvement de rotation uniforme autour de son axe.

(1) Dans les cours, la rotation du cylindre s'obtient par la chute d'un poids B suspendu à une corde enroulée sur un treuil C. La corde en se déroulant fait tourner une roue dentée qui engrène à la fois par des vis sans fin D et E avec l'axe du cylindre et avec un autre axe muni de quatre ailettes F. Les ailettes sont entraînées avec une vitesse *croissante* et éprouvent une résistance de l'air qui augmente rapidement avec cette vitesse. Le mouvement du cylindre est d'abord accéléré parce qu'il est produit par la

En regard du cylindre, on laisse tomber une masse cylindro-conique en fer G, portant un crayon horizontal H dont la pointe est pressée légèrement par un petit ressort contre la surface du cylindre qui est recouverte d'une feuille de papier. Cette masse est munie d'oreilles *o*, *o'* glissant sur des fils d'acier verticaux *f* bien tendus qui guident sa chute (fig. 71).

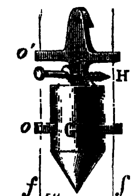


Fig. 71.

Courbe tracée sur le cylindre. — La masse étant immobile devant le cylindre tournant, le crayon trace sur la surface du cylindre une circonférence. Si la masse tombe devant le cylindre en repos, le crayon trace une ligne verticale. Lorsque le cylindre tourne pendant la chute de la masse, le crayon rencontre les génératrices successives en des points de plus en plus bas et trace une courbe.

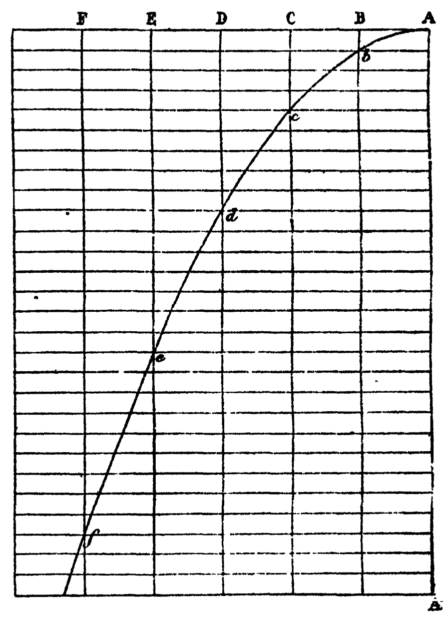


Fig. 72.

Des arcs égaux AB, BC, CD, DE, pris sur la circonférence de la base supérieure du cylindre, correspondent à des temps égaux pendant le mouvement uniforme du cylindre. Menons des génératrices par les points de division B, C, D, E ; la courbe tracée par le crayon les rencontre à des distances de la circonférence supérieure qui représentent les hauteurs de chute après des temps 1, 2, 3, 4...

On détache du cylindre la feuille de papier, après l'avoir coupée suivant la génératrice verticale AA' qui passe par le point de départ du crayon et on la déroule sur un plan (fig. 72). La droite AF, perpendiculaire à AA', est le développement de la circonférence de base

---

chute d'un poids, mais à un certain moment la résistance au mouvement des ailettes fait équilibre au poids qui est constant; alors l'accélération devient nulle, et le cylindre prend un mouvement uniforme. A ce moment on fait tomber la masse cylindro-conique G en abaissant, à l'aide d'un cordon, la longue branche du levier LOM.

du cylindre; les longueurs B*b*, C*c*, D*d*... sont les hauteurs de chute après des temps 1, 2, 3..., C*c* = 4 B*b*, D*d* = 9 B*b*, E*e* = 16 B*b*,...

La longueur des verticales B*b*, C*c*... croît donc proportionnellement aux carrés des temps ou des longueurs AB, AC. Cette propriété caractérise la courbe appelée *parabole*. La forme parabolique du tracé confirme donc la loi des espaces.

Le poids et la forme de la masse qui tombe rendent la résistance de l'air négligeable, du moins pour cette petite hauteur. Le poids qui tombe est assez lourd pour que le frottement du crayon sur le papier n'apporte aucune perturbation.

78. Troisième loi. **Loi des vitesses.** — La loi des espaces étant vérifiée, la recherche de la loi des vitesses est superflue (**3**). Toutefois, la vérification est aisée avec la machine d'Atwood.

On sait que, si la force qui agit sur un mobile cesse d'agir, la vitesse du mouvement uniforme que prend le mobile est la vitesse du mouvement varié au moment où la force a été supprimée (**26**).

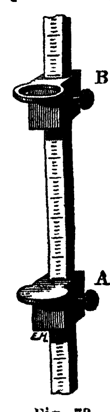


Fig. 73.

On obtient d'après cela les vitesses acquises par le système, à différents instants, en arrêtant par un curseur annulaire B, après 1, 2, 3 secondes de chute, la masse additionnelle m qui a une forme allongée (fig. 67); la masse M continue à descendre d'un mouvement uniforme; on l'arrête à son tour, à l'aide du curseur plein A, exactement une seconde après l'arrêt de la masse m par le curseur annulaire. La distance AB des deux curseurs (fig. 73) représente la vitesse du système au moment où le poids additionnel a été supprimé.

Les vitesses v_1, v_2, v_3... après 1, 2, 3 secondes de chute, sont trouvées *proportionnelles au temps* : $v = \gamma t$.

79. Accélération dans la machine d'Atwood. — Les différences successives $v_2 - v_1$, $v_3 - v_2$, $v_4 - v_3$ sont les accroissements égaux de vitesse pendant les secondes successives; ils représentent l'accélération. Cette accélération est, pour un même poids additionnel, le double de l'espace parcouru pendant la première seconde de chute.

Les deux lois du mouvement de chute dans la machine d'Atwood sont formulées par les équations : $e = \frac{1}{2}\gamma t^2$, $v = \gamma t$.

Si l'on fait *croître la masse additionnelle*, en laissant 2M + m

constant, γ augmente, mais les lois des espaces et des vitesses restent les mêmes. Dans la chute *libre* de la masse additionnelle, γ prend la valeur g, d'où les deux équations : $e = \frac{1}{2} gt^2$, $v = gt$.

Calcul de g. — L'accélération γ du mouvement ralenti et l'accélération g en la chute libre se déduisent l'une de l'autre.

Puisque le poids p communique l'accélération γ à la masse $2M + m$, on a : $p = (2M + m)\gamma$ (**35**). En tombant librement et seule, la masse m prendrait une accélération g; par suite, $p = mg$.

On a donc $mg = (2M + m)\gamma$, d'où $g = \frac{2M + m}{m}\gamma = \frac{2P + p}{p}\gamma$, d'après la proportionnalité des masses aux poids (1).

L'appareil Morin donnerait la valeur de g en déterminant le nombre de tours du cylindre par seconde (2) : on pourrait alors mesurer la hauteur de chute après une seconde. Le nombre g sera déterminé avec plus de précision avec un pendule (**86**).

Vérification de la proportionnalité des forces aux accélérations au moyen de la machine d'Atwood. — Pour faire agir successivement sur une même masse différentes forces constantes, on emploie plusieurs masses additionnelles de même poids p.

Si l'on place cinq de ces masses sur l'une des deux masses M; les masses suspendues aux deux extrémités du fil seront :

$$M, \text{ et } M + 5m : \text{force motrice } 5p;$$

Changeons de côté une masse m, la masse totale à mouvoir reste la même, nous avons une nouvelle distribution des masses :

$$M + m, M + 4m : \text{force motrice } 3p.$$

Après un nouveau transport d'une masse m, les masses seront :

$$M + 2m, M + 3m : \text{force motrice } p.$$

Aux forces $5p$, $3p$, p entraînant une masse constante $2M + 5m$, correspondent des accélérations 5γ, 3γ et γ.

80. Chute dans l'air.

— La force qui fait tomber un corps dans le vide est son poids. La force qui le fait tomber dans l'air est

---

(1) La poulie est entraînée par la chute du poids p; pour en tenir compte approximativement, négligeons la masse de l'axe et des rayons de la poulie, appelons μ et ϖ la masse et le poids de sa circonférence, la masse μ s'ajoute à la masse entraînée; par suite

$$g = \frac{\mu + 2M + m}{m}\gamma = \frac{\varpi + 2P + p}{p}\gamma.$$

(2) Le nombre de tours peut être obtenu en faisant vibrer devant le cylindre un diapason de n vibrations simples par seconde. Ce diapason, muni d'un style, fait un tracé sur la circonférence de base du cylindre; le nombre K de sinuosités comptées entre deux génératrices, donne la durée $\frac{K}{n}$ de la chute entre les deux génératrices.

la différence entre son poids mg *et la résistance* R *de l'air*. Pour une même forme extérieure et une même vitesse, la résistance de l'air est la même, elle est donc une fraction d'autant plus grande du poids que le poids est plus petit et la *force efficace*, égale à $mg - R$, peut devenir très faible et s'annuler.

Lorsque le corps qui tombe n'a pas une grande densité et offre une surface étendue, la résistance de l'air devient importante. Elle retarde la chute des flocons de neige, assure la descente lente des parachutes, permet le vol des oiseaux et l'aviation.

Vitesse limite. — La force efficace étant $mg-R$, le mouvement resterait uniformément accéléré si la résistance de l'air était constante. Mais cette *résistance augmente avec la vitesse de chute*. Proportionnelle à la la vitesse pour de très faibles vitesses, au carré de la vitesse pour des vitesses qui ne dépassent pas 30 mètres par seconde, elle croît plus rapidement pour des vitesses supérieures. Comme la vitesse v à un instant donné, somme de toutes les vitesses des secondes successives, croît constamment, il arrive un moment où *la résistance de l'air devient égale au poids*. A partir de ce moment, le mouvement est *uniforme* puisque la force efficace $mg = R$ est nulle; on a atteint une ***vitesse limite***.

Si l'air repoussé par le corps qui tombe ne sortait pas du canal cylindrique vertical mené tangentiellement au corps qui tombe, la résistance de l'air pourrait être représentée par KSv^2, S étant la section droite du canal cylindrique et K un coefficient constant. La vitesse limite

d'après $mg = KSv_1^2$, est $v_1 = \sqrt{\frac{mg}{KS}}$

elle est d'autant plus faible que la masse du corps est plus petite et que la surface qu'il offre à l'action de l'air est plus étendue.

L'expérience montre que *le coefficient* K *est variable avec la forme antérieure du corps qui tombe,* il est notablement plus grand pour un cylindre droit à axe vertical que pour une sphère et il devient très petit pour la masse cylindro-conique de l'appareil Morin.

Dans le cas particulier d'une *sphère,* $K = \frac{27}{10^5}$; si la sphère a un rayon r et une densité δ, on a : $mg - R = \frac{4}{3}\pi r^3 \delta g - \frac{27}{10^5}\pi r^2 v^2$.

Pour la vitesse limite, $mg - R = 0$ et $v^2_1 = \frac{4.10^6}{3.27}.r\delta g;$

la vitesse limite est proportionnelle à la racine carrée de la densité.

Supposons des sphères de un centimètre de diamètre. On trouve pour le platine une vitesse limite supérieure à 100 mètres, avec le laiton, environ 44 mètres, avec l'aluminium 23 mètres et pour un grêlon 15 mètres.

S'il s'agit de gouttes de pluie de très petit diamètre, la vitesse limite est très faible et les gouttes restent facilement suspendues dans l'air; il en est de même des poussières.

La résistance de l'air exerce des effets très importants sur *les projectiles* dont elle atténue considérablement les effets, sur les trains rapides en marche, sur les navires aériens.

PENDULE

81. Un **pendule** est *un corps pesant mobile autour d'un axe fixe horizontal, appelé axe de suspension, qui ne passe pas par son centre de gravité* (balancier d'horloge, fléau de balance).

Un **pendule simple** est formé par un point matériel pesant A suspendu à l'une des extrémités d'un fil inextensible et sans poids; l'autre extrémité du fil est soutenue par un point fixe. C'est un pendule *idéal*, dont la conception sert à établir théoriquement les lois du mouvement pendulaire. Tout autre pendule est appelé **composé**.

Mouvement pendulaire. — *Le mouvement d'un pendule est déterminé par son poids.* Considérons un pendule simple, oscillant *dans le vide*, sans frottement contre son point d'appui. Lorsque le fil est vertical, le poids du point A agit suivant la direction même du fil et son action est équilibrée par la résistance du point d'appui O.

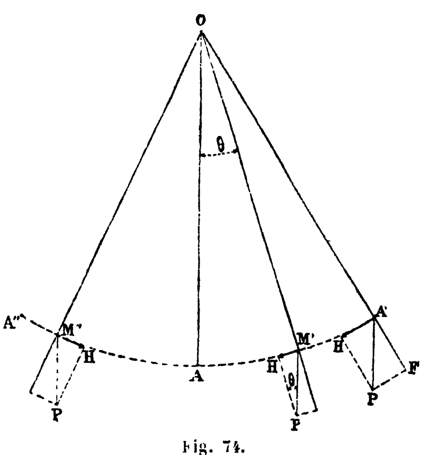


Fig. 74.

Écartons le pendule de sa position d'équilibre OA jusqu'à OA' (fig. 74); si on l'abandonne, il oscille autour de OA dans un plan vertical invariable. En effet, le poids A'P de la molécule se décompose, suivant la règle du parallélogramme, en deux composantes A'F et A'H dans le plan PA'O ou A'OA. La composante A'F, en prolongement du fil, a pour effet de le tendre; la composante perpendiculaire A'H produit le mouvement du point. Le plan AOA' contient la composante A'H; le point A' reste dans ce plan et il y décrit une circonférence de centre O [1].

(1) Le mouvement est le même que si la rotation s'effectuait autour d'un axe fixe perpendiculaire au plan AOA'

Supposons le poids descendu en M′, et soit θ l'angle d'écart AOM′; M′P étant égal à *mg*, la composante efficace M′H $= mg \sin\theta$ décroît avec l'angle d'écart. En A, M′H s'est annulé, mais le poids ne s'arrête pas, car il a une vitesse acquise, égale à la somme des vitesses qui lui ont été communiquées par M′H de A′ en A [1]. Par sa vitesse acquise, le point matériel s'élève de l'autre côté; mais, de ce côté, dans une position quelconque symétrique de M′, la composante M′H diminue la vitesse d'une quantité précisément égale à celle dont elle l'a augmentée en M′. La totalité de la vitesse imprimée par la pesanteur, de A′ en A, sera annulée quand le point matériel se sera élevé jusqu'en A″, symétrique de A′ par rapport à la verticale OA. En A″ la vitesse est nulle. De A″ la molécule redescendra jusqu'en A, remontera en A′ et exécutera autour de la verticale OA une série indéfinie d'oscillations égales.

L'angle d'écart maximum AOA′ est l'*amplitude*. Une *oscillation simple* est le passage d'une position extrême A″ à la position extrême consécutive A′. Une *oscillation complète* comprend deux oscillations simples, de sens opposés, de A″ en A′ et de A′ en A″.

82. Durée de l'oscillation. — Le mouvement d'un pendule simple est un mouvement *oscillatoire périodique*. L'étude mathématique du mouvement du pendule simple conduit pour la durée en secondes d'une oscillation *simple*, dans le cas des oscillations d'*amplitude très petite*, à la formule *indépendante de l'amplitude*

$$t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}};$$

l longueur OA du pendule, g accélération de la pesanteur; l et g sont exprimés avec une même unité de longueur; π est le rapport de la circonférence au diamètre.

Si l'amplitude n'est pas très petite, la durée de l'oscillation est le produit de $\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ par un facteur qui croît avec l'amplitude [2].

(1) Dans sa chute sur les petits plans inclinés successifs que forment les éléments de la circonférence parcourue par le corps pesant de A′ en A.

(2) Elle est exprimée par la formule :

$$t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}} \left[1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \sin^2\frac{\alpha}{2} + \left(\frac{1.3}{2.4}\right)^2 \sin^4\frac{\alpha}{2} + \left(\frac{1.3.5}{2.4.6}\right)^2 \sin^6\frac{\alpha}{2} + \dots\right]$$

qui se réduit, pour α petit à $t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}\left(1 + \frac{\alpha^2}{16}\right)$.

Si l'amplitude atteint 10^0, l'erreur commise en négligeant la parenthèse n'est encore que $\frac{1}{2000}$ environ de la durée.

En comptant les temps sur une horizontale et en traçant des ordonnées égales aux écarts angulaires de la position d'équilibre, la courbe représentative du mouvement oscillatoire pendulaire est une **sinusoïde**, elle est formée de parties égales situées au-dessus et au-dessous de XX′ (fig. 75) (1).

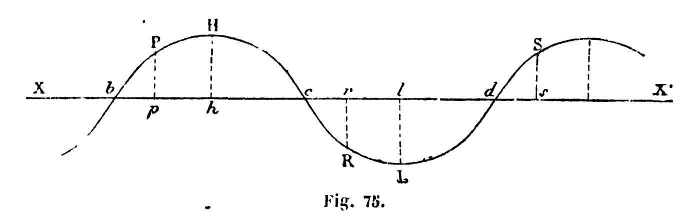


Fig. 75.

Aux époques *b*, *c*, *d* de la ligne des abscisses, le mobile passe par sa position d'équilibre. A partir de *b*, l'écart augmente ; il est maximum en H, pour AA′ ; puis, il diminue pour redevenir nul en *c* ; alors le mouvement change de sens ; le maximum de distance à gauche, AA″, correspond au point figuratif L, puis le mobile revient et l'ordonnée diminue en valeur absolue jusqu'en *d*.

La période $2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ est *bd* ou encore la distance qui sépare deux ordonnées égales correspondant à deux positions identiques du mobile. A un intervalle d'une demi-période, les ordonnées P*p*, R*r* sont égales et de signes contraires.

83. Pendule composé. — Un pendule simple ne peut être réalisé, tout pendule est un pendule composé.

Un pendule composé (fig. 76), dont l'axe de suspension se projette en O, et dont le centre de gravité est en G, abandonné à lui-même, prend une position d'équilibre stable quand la verticale OG menée par le centre de gravité rencontre l'axe de suspension. En effet, la résistance de l'axe détruit alors l'action du poids. Écartons le pendule et amenons le centre de gravité en G′ ; le poids du pendule peut être décomposé en deux composantes dans le plan

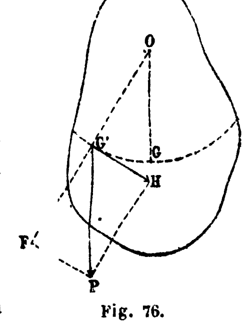


Fig. 76.

(1) Les angles d'écart successifs sont donnés par l'expression $\theta = \theta_m \sin 2\pi \frac{t}{T}$, où θ_m représente l'angle d'écart maximum, et T la durée d'une oscillation complète.

Au temps o, on a $\theta = o$; au temps $\frac{T}{4}$, $\theta = \theta_m$; pour $t = \frac{T}{2}$, $\theta = o$; si $t = \frac{3T}{4}$, $\theta = -\theta_m$; l'écart est maximum de l'autre côté de la position d'équilibre quand $t = T$, $\theta = o$.

vertical PG′O perpendiculaire à l'axe : la composante G′F dont le prolongement rencontre l'axe est sans effet, la composante perpendiculaire G′H produit le mouvement; le centre de gravité décrit une circonférence dans le plan vertical PG′O. La composante G′H décroît avec l'angle d'écart, elle est nulle quand la verticale du centre de gravité passe en O, mais le pendule continue son mouvement par sa vitesse acquise. Le mouvement est oscillatoire autour de la position d'équilibre.

On démontre que le mouvement oscillatoire d'un pendule est identique à celui d'un pendule simple de longueur déterminée, appelé **pendule synchrone** du pendule composé.

La durée des oscillations simples, très petites, d'un pendule quelconque dans le vide est, d'après cela, représentée par $\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$, où l désigne la longueur du pendule simple synchrone (1).

La longueur du pendule synchrone a pour expression $l = \frac{I}{Ma}$; M est la masse du pendule composé ou son poids en grammes, a la distance du centre de gravité du pendule à l'axe de suspension; I est le moment d'inertie Σmr^2 (**38**) du pendule par rapport à l'axe de suspension. A masse constante, la longueur l diminue quand I diminue et quand a augmente.

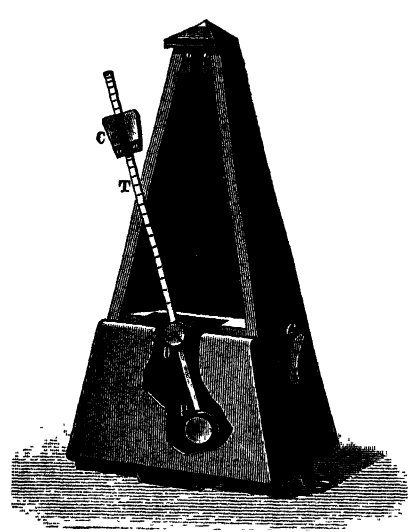


Fig. 77.

Axe d'oscillation. — Si, à partir du point O de suspension (fig 76), on prend sur la ligne OG une longueur égale à l, on obtient, au delà de G, un point O′, appelé *centre d'oscillation*. Quand on fait tourner le pendule autour d'un axe qui passe par le centre d'oscillation et qui est parallèle à l'axe primitif de suspension, la *durée de l'oscillation est la même* qu'autour de l'axe de suspension. Les deux

(1) Les angles d'écart successifs du pendule composé sont à tout instant les mêmes que ceux du pendule simple synchrone et donnés par l'équation $\theta = \theta m \sin 2\pi \frac{t}{T}$, où la période T est $2\pi\sqrt{\frac{l}{a}}$.

axes de suspension et d'oscillation sont dits ***réciproques*** (1) l'un de l'autre. Leur distance est la longueur du pendule simple synchrone.

Métronome. Le métronome est un pendule dans lequel on peut modifier le moment d'inertie I et la distance a du centre de gravité à l'axe de suspension. Une masse de plomb P (fig. 77) est fixée à l'extrémité inférieure d'une tige qui tourne autour d'un axe de suspension O; une autre masse C se déplace sur la partie supérieure de cette tige.

Pour une certaine position de la masse mobile C, le centre de gravité est en O et la longueur l devient infinie. Si l'on descend, CI diminue et en même temps a augmente; pour ces deux raisons l diminue. A chaque position de C on a inscrit sur la tige le nombre correspondant de demi-oscillations par minute.

LOIS DES OSCILLATIONS

84. Les lois des oscillations d'un pendule se déduisent de l'expression $\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ de la durée des petites oscillations.

Loi de l'isochronisme. — *En un même lieu, pour de petites amplitudes, la période d'un même pendule est constante, malgré les variations de l'amplitude.* En effet, l'amplitude, si elle reste petite, ne figure pas dans l'expression de la période.

En mesurant avec un chronomètre la durée de cent oscillations, puis celle des cent suivantes, on reconnaît que cette durée reste la même quand l'amplitude varie, qu'elle soit de 5 degrés ou de 2 degrés. La vérification est d'autant plus rigoureuse que les amplitudes sont plus petites (2).

Loi des accélérations. — *Dans des localités différentes, la durée d'une oscillation d'un même pendule varie en raison inverse de la racine carrée de l'accélération de la pesanteur.*

$$\frac{t}{t'} = \frac{\sqrt{g'}}{\sqrt{g}}.$$

(1) Le moment d'inertie d'un pendule autour de son axe O de suspension étant Σmr et le moment d'inertie autour d'un axe parallèle au précédent passant par le centre de gravité G étant MK^2, un calcul fait voir que $\Sigma mr^2 = MK^2 + Ma^2$ ($a = OG$). D'après cela, $\frac{I}{Ma} = l = \frac{Ma^2 + MK^2}{Ma} = a + \frac{K^2}{a}$; $GO' = \frac{K^2}{a}$, $OO' = OG + GO' = l$.

Si l'on fait osciller le pendule autour de l'axe d'oscillation, la durée de l'oscillation devient $l' = a' + \frac{K^2}{a'}$ où $a' = \frac{K^2}{a}$. En remplaçant a' par $\frac{K^2}{a'}$, on voit que $l' = l$.

(2) Si le pendule n'était soumis qu'à l'action de son poids, l'amplitude resterait indéfiniment la même, mais la résistance de l'air et le frottement de l'axe de suspension sur son support *amortissent* peu à peu l'amplitude. L'amplitude des petites oscillations décroît en *progression géométrique* quand le temps croît en progression arithmétique.

Les deux lois précédentes se vérifient avec un pendule quelconque; les deux suivantes exigent la connaissance de la longueur du pendule synchrone. Avec des pendules formés comme un fil à plomb d'une sphère pesante de très petit diamètre par rapport à la longueur du fil, la longueur l du pendule synchrone est très approximativement la distance du centre G de la sphère au point de suspension (1).

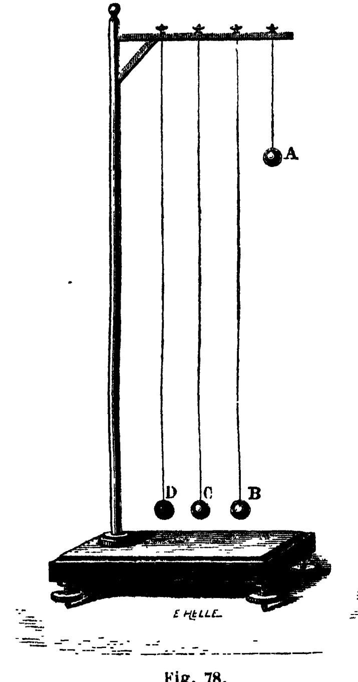


Fig. 78.

Loi des longueurs. — *En un même lieu, la durée d'une oscillation est proportionnelle à la racine carrée de la longueur du pendule.*

Si les longueurs sont 1, 4, 9..., les durées d'oscillation croissent comme 1, 2, 3... Deux pendules B et A (fig. 78) ayant pour longueurs 1 mètre et 25 centimètres, le premier fait une oscillation quand le second en fait deux.

Loi de la matière du pendule. — *Pour des pendules de même longueur, en un même lieu, la durée de l'oscillation ne dépend ni de la masse ni de la substance du pendule.* Cela résulte de ce que g a la même valeur pour tous les corps. On vérifie cette loi avec des pendules B, C, D (fig. 78), formés de fils de même longueur, soutenant des boules de même diamètre et de diverses substances : plomb, ivoire, etc.

On se sert du pendule pour la mesure du temps. On l'emploie aussi à la détermination de l'intensité de la pesanteur.

APPLICATION DU PENDULE AUX HORLOGES

Pour la mesure du temps, on se sert d'un pendule ou régulateur

---

(1) $l = OG + GO'$ où $OG = a$; $GO' = \frac{K^2}{a}$ est négligeable, car K^2 est petit et a grand. Le point G est très sensiblement le centre de la sphère.

qui bat la seconde; un compteur à rouage, entraîné par un moteur, inscrit le nombre des oscillations du pendule.

85. Les *horloges* et *chronomètres* comprennent un *moteur*, un *régulateur* et un *rouage* intermédiaire entre le moteur et le régulateur; ils sont munis d'aiguilles qui se déplacent, sur un cadran, d'angles égaux en des temps égaux.

Moteur. — Dans une *horloge*, le moteur est un *poids* P suspendu à l'extrémité d'une corde qui est enroulée sur un cylindre horizontal O quand l'horloge est remontée. Le cylindre porte, centrée sur son axe, une première roue dentée par laquelle le mouvement du poids est transmis à tout le rouage.

Dans une *montre* ou un *chronomètre*, le poids moteur est remplacé par la force élastique d'un *ressort* en acier mince tendu ou *remonté*. L'extrémité intérieure du ressort est fixée sur une saillie d'un axe central immobile, l'autre extrémité est attachée à la circonférence d'un cylindre creux ou *barillet* dans lequel est logé le ressort. Le ressort, en se détendant, fait tourner le barillet et, avec lui, une première roue dentée, centrée sur le barillet.

Rouage. — Le rouage se compose de *roues dentées* successives. Chacune porte sur son axe une roue beaucoup plus petite appelée *pignon* qui engrène avec la roue précédente; le mouvement du moteur se transmet de roue en roue de la première à la dernière. A une rotation lente de la première correspond une rotation rapide de la dernière. Si la dernière fait un tour par minute, les roues dont les axes portent les aiguilles des minutes et des heures font respectivement un tour par heure et un tour en douze heures.

Régulateur. — Le mouvement du poids dans sa chute ou du ressort dans sa détente tendrait à s'accélérer, un régulateur est adapté à l'horloge ou à la montre pour régulariser la marche du moteur et du rouage en suspendant leur action sur les axes des aiguilles à des intervalles de temps égaux. A chaque reprise du mouvement, les conditions redeviennent les mêmes qu'au départ; pendant chaque mouvement, chaque roue a décrit un arc de cercle constant, variable avec le numéro d'ordre de la roue. Le mouvement, pendant une minute, est fractionné en 60 mouvements successifs, saccadés, très courts, d'une égale durée. Le régulateur agit sur la dernière roue du rouage ou roue d'échappement par un mécanisme variable appelé *échappement*.

Le régulateur d'une horloge est un pendule pesant qui bat la seconde; sa tige, mobile à son extrémité supérieure autour d'un axe

horizontal fixe, porte une lentille à son extrémité inférieure.

Échappement à ancre. — Dans ce dispositif, la roue d'échappement porte de longues dents, égales, légèrement inclinées dans le même sens. Au-dessus de cette roue oscille un arc métallique appelé *ancre* qui pivote autour d'un axe fixe O (fig. 80); l'ancre est solidaire du pendule qui l'entraîne. Les bras de l'ancre sont terminés par deux crochets A et B qui s'engagent alternativement entre les dents de la roue.

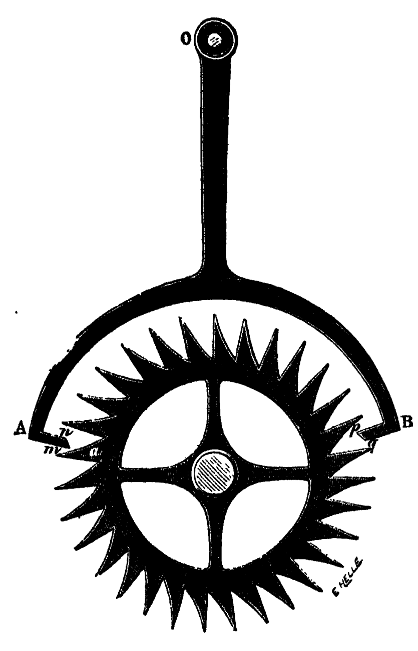


Fig. 80.

Quand le pendule oscille de gauche à droite, le crochet A de l'ancre se rapproche de la roue et s'engage entre deux dents. La roue d'échappement est brusquement immobilisée et avec elle le rouage et le moteur. En revenant de droite à gauche avec le pendule, l'ancre dégage le crochet A. La dent *a échappe* à A et la roue tourne légèrement, mais le crochet B se rapproche à son tour et s'engage entre deux dents. Puis le crochet B s'écarte, la roue tourne de nouveau et ainsi de suite.

Les oscillations du pendule, qui ne tarderaient pas à s'éteindre à cause des frottements, sont entretenues par le mouvement même du moteur. A cet effet, les deux crochets A et B de l'ancre sont taillés en biseau et présentent du côté de la roue des surfaces planes *mn*, *pq*, inclinées en sens contraires. La dent qui échappe communique au pendule, par son frottement sur le biseau, une impulsion qui entretient le mouvement. Les oscillations conservent très sensiblement la même amplitude et sont *rigoureusement isochrones* (1).

Pendule compensateur. — Lorsque la température s'élève, la longueur du pendule augmente et en même temps la période, et alors l'horloge retarde. Si l'horloge n'est pas installée dans une cave de température inva-

(1) La durée de l'oscillation du pendule varie avec le lieu où il se trouve.

riable, un *pendule compensateur* évite les variations dues à la température.

Une compensation très répandue est réalisée par le *pendule à gril*. Le système qui relie la lentille pesante à l'axe de suspension est formé par une tige de fer F qui porte un cadre rectangulaire; sur la base du cadre s'élèvent deux tiges de laiton L portant en haut une traverse d'où partent deux tiges de fer descendantes. Ces deux tiges sont reliées en bas par une traverse d'où s'élèvent deux nouvelles tiges de laiton réunies par une dernière traverse à laquelle est suspendue une tige de fer F qui soutient la lentille (fig. 81).

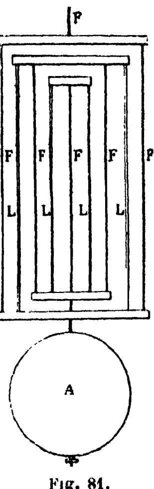


Fig. 81.

La dilatation, de haut en bas, des tiges de fer *abaisse* la lentille, tandis que la dilatation, de bas en haut, des tiges de laiton L la *relève*. La compensation, une fois réalisée, subsiste à toute température.

Dans une compensation plus simple, l'écrou *e* qui maintient la lentille A est vissé à l'extrémité d'une tige de *bois* ou d'*acier au nickel*, très faiblement dilatable, qui relie directement la lentille à l'axe de suspension du pendule. L'allongement de la tige, par élévation de température, abaisse l'écrou et le centre de la lentille; cet allongement, très petit, compense l'élévation du centre de la lentille due à la dilatation de la lentille.

Balancier à ressort spiral. — Le pendule pesant est applicable aux horloges fixes, mais ils ne l'est pas aux montres qui doivent marcher dans toutes les positions. Dans une montre, le pendule est un balancier à ressort spiral. Ce balancier est une roue circulaire très mobile, sans dents, soustraite dans ses oscillations a l'action de la pesanteur. Elle reçoit son mouvement d'un petit ressort plat, en acier trempé, contourné en spirale et appelé *spiral*. Ce ressort est attaché par l'une de ses extrémités *o* au pourtour de l'axe mobile du balancier (fig. 82), qui est perpendiculaire au plan de la spirale; il est fixé par l'autre en *a* à l'une des deux plaques métalliques qui supportent le mouvement de la montre. Si le balancier est écarté légèrement dans un sens, le ressort se tend et, en revenant par son élasticité à sa position primitive, il entraîne le balancier en sens inverse. Dans ses déformations alternatives;

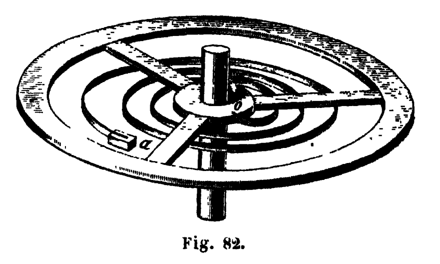


Fig. 82.

le ressort fait osciller le balancier et les oscillations du balancier sont *isochrones*, comme celles du ressort.

En tournant, l'axe du balancier peut mettre en mouvement une ancre dont les crochets s'interposent à chaque oscillation entre les dents de la roue d'échappement, ce qui arrête, à des intervalles de temps égaux, la roue d'échappement que le moteur entraîne toujours dans le même sens, par l'intermédiaire du rouage. Ce sont encore les dents de la roue d'échappement qui entretiennent, par la force du moteur, le mouvement du balancier en lui donnant une impulsion au moment où elles se dégagent. L'intensité de la pesanteur n'agit pas sur la période d'oscillation du ressort spiral (1).

MESURE DE L'INTENSITÉ DE LA PESANTEUR

86. En un lieu déterminé, l'*intensité de la pesanteur* est le poids en dynes de l'unité de masse. Or, d'après la relation $p = mg$, l'accélération de la pesanteur en centimètres est exprimée par le même nombre que le poids de l'unité de masse en dynes, car si l'on prend $m = 1$, on a $p = g$.

En différents lieux, un dynamomètre, gradué en dynes, soutenant un corps *de masse connue* (par la balance), donnerait directement le poids de ce corps et, par suite, le poids de l'unité de masse.

On obtient avec précision le nombre g, en un lieu déterminé, en mesurant la durée t d'une oscillation d'un pendule et la longueur l du pendule synchrone, d'après la relation :

$$g = \frac{\pi^2 l}{t^2};$$

g et l s'expriment avec la même unité de longueur et t en secondes.

Mesure de la durée d'une oscillation. — Un pendule étant immobile, on vise avec une lunette un trait marqué sur sa tige. Puis, faisant osciller le pendule, on compte un nombre n de passages du trait devant le réticule d'une lunette, pour N secondes lues sur un chronomètre. La durée d'une oscillation est $\frac{n}{N}$.

Mesure de la longueur du pendule synchrone. — On peut s'appuyer sur *la réciprocité des axes de suspension et d'oscillation* (**83**); on cherche par tâtonnements deux axes parallèles

(1) Dans une horloge qui retarde, on raccourcit le pendule. Dans une montre on raccourcit le ressort spiral.

dont le plan contienne le centre de gravité du pendule et tels que les durées d'une oscillation du pendule autour de ces deux axes soient égales. La distance des deux axes est la longueur l. Le pendule qui sert à cette mesure est dit *réversible*.

Résultats. — Variations avec l'altitude. — En un même lieu, l'intensité de la pesanteur diminue quand on s'élève dans l'atmosphère; elle est inversement proportionnelle au carré de la distance au centre de la Terre.

Appelons R le rayon de la terre, h l'altitude, g' l'intensité à l'altitude h, g_0 l'intensité au niveau de la mer (au même lieu).

$$\frac{g'}{g_0} = \frac{R^2}{(R+h)^2} = \frac{1}{1+\frac{2h}{R}+\frac{h^2}{R^2}} \text{ ou }^{(1)} \frac{1}{1+\frac{2h}{R}} \text{ ou } 1 - \frac{2h}{R}.$$

La variation de l'intensité de la pesanteur avec l'altitude a été vérifiée en plaçant une balance au sommet d'une tour. A l'un des plateaux de la balance étaient suspendus par un fil, l'un au-dessous de l'autre et distants de 20 mètres, deux ballons fermés; l'un A contenait un poids de 5 kilogrammes de mercure, le second B était vide. Sur l'autre plateau on faisait la tare, en ayant soin, pour n'avoir pas à tenir compte de la poussée de l'air, de suspendre au-dessous de ce plateau, par un fil identique au premier, deux ballons A_1 et B_1 de même volume extérieur que les premiers et aux mêmes altitudes (**240**). La tare ayant été faite avec le ballon A en haut on faisait l'*échange vertical* de A et B. Lorsque A était en bas, il fallait ajouter 31 milligrammes environ sur le plateau correspondant pour rétablir l'équilibre. Ce poids additionnel différait peu du poids calculé (2).

Sur une petite hauteur, en s'élevant, un poids d'un kilogramme perd environ un tiers de milligramme par mètre.

Variations avec la latitude. — En des localités différentes, l'accélération réduite au niveau de la mer dépend de la *latitude;* elle augmente de l'équateur aux pôles pour deux causes de même sens : 1° l'*aplatissement de la terre* aux pôles qui fait que la distance d'un point de la surface au centre est plus faible à l'équateur qu'aux pôles; 2° la *rotation de la terre* autour de la ligne de ses pôles.

La cause principale est la ***rotation de la terre autour de la ligne de ses pôles***. Un corps M, de masse m, soutenu par un fil à plomb, est sou-

---

(1) $\frac{h^2}{R^2}$ est négligeable pour les valeurs pratiques de h.

(2) De $\frac{g'}{g_0} = 1 - \frac{2h}{R}$ on déduit $\frac{g_0 - g'}{g_0} = \frac{mg_0 - mg'}{mg_0} = \frac{p_0 - p'}{p_0} = \frac{2h}{R}$.

Supposons p_0 égal à 5 kilogrammes au lieu de l'observation;

$$\frac{p_0 - p'}{p_0} = \frac{p_0 - p'}{5} = \frac{2.20.\ 2\pi}{2\pi R} = \frac{2.20.2\pi}{40.10^6};\ p_0 - p' = \pi.10^{-5} = 0^{kg},000\ 031.$$

mis d'une part à l'action attractive MA du globe, dirigée vers le centre O et d'autre part à la traction MS du fil de suspension. Comme il décrit uniformément en 24 heures le parallèle de rayon $CM = r$, la force centripète F, dirigée suivant le rayon, qui maintient sa masse sur le parallèle et qui est égale à $m\omega^2 r$, doit être à chaque instant la *résultante* de MA et de MS (fig. 83).

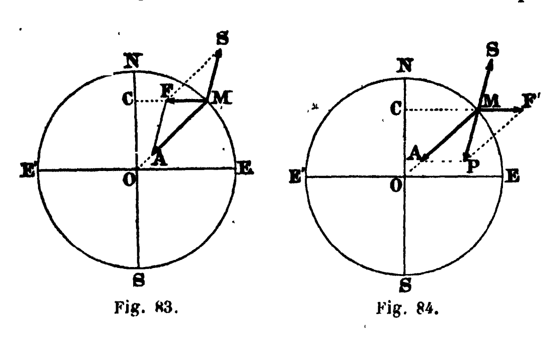


Fig. 83. Fig. 84.

Le poids P de la masse m, égal et contraire à la traction MS du fil, n'est donc pas égal à MA et n'est pas dirigé suivant le rayon OM.

Si nous introduisons une force F' (fig. 84), égale et contraire à F et appelée *force centrifuge*, les 3 forces MA, MS et F' se font équilibre et l'une quelconque des trois, par exemple la traction MS du fil, est égale et contraire à la résultante des deux autres MA et F', ou encore le poids P est la résultante de MA et F'. Dans cet équilibre, une accélération centrifuge $\omega^2 r$, dirigée suivant le rayon du parallèle décrit, tend à éloigner le corps pesant de l'axe de rotation.

A la latitude λ, l'accélération centrifuge $\omega^2 r$ a pour valeur

$$\frac{4\pi^2}{T^2} r = \frac{4\pi^2}{T^2} R \cos\lambda = \frac{4\pi^2}{(86400)^2} \cdot \frac{4.10^9}{2\pi} \cos\lambda \,{}^{(1)} = 3,38 \cos\lambda$$

Au pôle, où $\cos\lambda = 0$, $\omega^2 r = 0$, le poids P est égal à l'attraction MA.

A l'équateur, où $\cos\lambda = 1$, $\omega^2 r = 3,38$, le poids P est la différence des deux forces MA et $\omega^2 r$, qui sont alors directement opposées.

Il suffirait de mesurer, avec un pendule, la valeur absolue de g à Paris. On transporterait ensuite en différents lieux un même pendule. Ayant déterminé les durées t et t' d'une oscillation, on appliquerait la proportion $\frac{t}{t'} = \frac{\sqrt{g'}}{\sqrt{g}}$ (la longueur l du pendule synchrone est indépendante du lieu de l'observation).

Valeurs g_0 de g au niveau de la mer :

à la latitude 0° (équateur)	978,07
à la latitude 45°	980,61
à Paris. Observatoire (48° 50′ 11″)	980,96
à la latitude 90° (pôle)	983,11

Le poids absolu d'un gramme augmente d'environ 5 dynes

(1) $T = 3600 \times 24$; $2\pi R = 4.10^9$ centimètres.

$\left(\frac{1}{200}\text{ de sa valeur}\right)$ de l'équateur au pôle. Pour Paris, $g_0 = 981$.

Longueur du pendule battant la seconde. — En un lieu où l'accélération est g, la longueur du pendule dont la durée d'oscillation est une seconde est donnée par l'équation $1 = \pi\sqrt{\frac{l}{g}}$,

$$\text{d'où } l = \frac{g}{\pi^2}.$$

$l = 99^c,39$ à Paris au niveau de la mer. La longueur du pendule à secondes augmente d'environ 5 millimètres de l'équateur au pôle.

POTENTIEL

87. Il faut dépenser un travail mgh pour porter une masse m du sol à un niveau h. Ce travail peut être restitué par la chute de la masse m. Si elle tombe librement, le travail mgh est transformé en une force vive équivalente; si, en tombant, elle fait monter une autre masse par l'intermédiaire d'une poulie, elle restitue sous forme de travail mécanique le travail qui lui avait été appliqué. De toutes façons, une masse m portée à une hauteur h en A, a une *capacité de travail*, à laquelle on donne le nom d'***énergie potentielle***. On appelle *potentiel* en un point A de niveau h, le travail gh qu'il faut dépenser pour porter l'unité de masse depuis le niveau de la mer jusqu'à la hauteur h. Au niveau de la mer, l'énergie potentielle est nulle, ainsi que le potentiel. Le potentiel est encore le travail que l'unité de masse peut produire en tombant du point A au niveau de la mer. Sur un plan horizontal de niveau h, le potentiel gh a partout la même valeur. Entre deux points A et B de niveau h et h', la différence de potentiel $g(h-h')$ est le travail qu'il faut dépenser pour porter l'unité de masse du point le plus bas B de hauteur h' au point le plus élevé A de hauteur h.

ATTRACTION UNIVERSELLE

88. Newton a admis que deux points matériels s'attirent *proportionnellement à leurs masses et en raison inverse du carré de leur distance*. Cette loi est la *loi de l'attraction universelle*.

Soient deux points matériels de masses m et m', distants de r, l'action de m sur m' et l'action de m' sur m sont deux actions égales et contraires (**32**), dirigées suivant la droite mm' et ayant pour expression :

$$f = G\frac{mm'}{r^2}$$

G est l'action qu'exercent l'une sur l'autre deux masses, égales à l'unité, distantes de 1 centimètre.

Par raison de symétrie, l'attraction d'une *couche sphérique homogène* sur un point extérieur est dirigée suivant le rayon qui va de ce point au centre de la couche. On démontre que l'attraction d'une couche sphérique homogène sur un point extérieur m est la même que si *toute la masse* M de la couche était *concentrée en son centre* (1) (fig. 85).

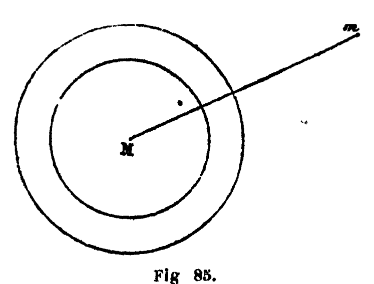


Fig 85.

Les mouvements des planètes autour du Soleil se déduisent de la loi générale de l'attraction universelle.

89. La pesanteur est un cas particulier de l'attraction universelle. — La Terre exerce sur les corps qui lui sont extérieurs une force attractive qui les fait tomber et qu'on appelle la pesanteur. Les lois de la pesanteur se déduisant de l'attraction universelle, la pesanteur apparaît comme un cas particulier de l'attraction universelle.

1° *La pesanteur est dirigée vers le centre de la Terre.* En effet, si l'on considère la Terre comme constituée par des couches sphériques homogènes, elle doit exercer sur un point matériel extérieur m la même action que si toute sa masse M était concentrée en son centre (fig. 85) et l'attraction est dirigée comme la pesanteur suivant un rayon terrestre (**76**).

2° Pour une chute d'une petite hauteur, la pesanteur est une *force constante* en un lieu déterminé.

En effet, d'après la loi de Newton, l'attraction exercée par la Terre sur un point extérieur doit varier en raison inverse du carré de la distance au centre. Appelons m la masse d'un corps qui tombe, R le rayon de la Terre, h la hauteur de chute, M la masse de la Terre,

$$f = G\frac{Mm}{(R+h)^2} \quad \text{ou} \quad \frac{GMm}{R^2\left(1+\frac{2h}{R}\right)} \quad \text{ou} \quad \frac{GMm}{R^2}\left(1-\frac{2h}{R}\right)$$

Si $\frac{h}{R}$ est négligeable, on a la valeur constante $f = \frac{GMm}{R^2}$

---

(1) ***Valeur expérimentale du coefficient G.*** — Cavendish a mesuré avec un dynamomètre très sensible l'attraction exercée par une petite sphère de platine sur une grosse sphère de plomb. En représentant par f cette attraction évaluée en dynes, par m et m' les masses en grammes des deux sphères, par d la distance de leurs centres en centimètres, on obtient la valeur en dynes du coefficient G de l'attraction universelle par la relation $f = G\frac{mm'}{d^2}$. On prend pour G la valeur $\frac{6,7}{10^8}$ dynes.

Masse et densité de la Terre. — La Terre exerce une action égale à g dynes sur une masse d'un gramme placée à sa surface. En désignant par M la masse de la Terre, par R son rayon, on a :

$$g = \frac{G.M \times 1}{R^2} \quad \text{d'où} \quad M = \frac{R^2 g}{G}$$

R étant évalué en centimètres, g et G en dynes, on obtient M en grammes ; la densité moyenne est le quotient de M par $\frac{4}{3}\pi R^3$. On trouve un nombre voisin de 5,5.

3° A une même distance h du centre de la Terre, *l'accélération g' de la pesanteur est la même dans le vide* pour des masses différentes.

Le poids s'exprime par $\frac{GMm}{(R+h)^2}$ ou par mg'

$$g' = \frac{GM}{(R+h)^2} \text{ a une valeur indépendante de } m.$$

4° *L'action exercée par la Terre sur la Lune est la pesanteur.* — Dans son mouvement de rotation autour de la Terre, la Lune décrit d'un mouvement uniforme une circonférence qui a pour centre le centre de la Terre et dont le rayon vaut 60 fois le rayon terrestre. La vitesse v de la Lune sur cette circonférence est de 1020 mètres par seconde (1).

Le mouvement de rotation de la Lune étant circulaire et uniforme, la Lune est attirée vers la Terre par une *force centripète* (**36**) constante, dirigée à tout instant suivant le rayon de la circonférence.

L'accélération de cette force centripète est (**11**).

$$\gamma = \frac{v^2}{60R} = \frac{\overline{1020}^2}{60.6360000} = 0{,}0027 \text{ ou } 2^{mm}7 \text{ (2)}.$$

L'attraction exercée par la Terre sur la Lune est la même que si la Lune était un corps pesant situé à une distance 60R du centre de la Terre, car si l'on compare cette accélération γ à l'accélération g d'un corps qui tombe à la surface de la Terre, on constate que : $0{,}0027 = \frac{g}{60^2}$.

Les planètes se comportent par rapport au Soleil comme des corps pesants qui tomberaient directement sur sa surface s'ils n'avaient pas une vitesse (3).

90. Variations de g à l'intérieur du globe terrestre. — La variation de g suit à l'intérieur de la Terre une loi qui se déduit d'un théorème relatif à l'attraction des couches sphériques. On démontre que l'attraction exercée sur une masse m placée en A à l'intérieur d'une sphère homogène de rayon R, à une distance r du centre, se réduit à l'action de la sphère de rayon r, les couches sphériques comprises entre

---

(1) R étant le rayon de la Terre en mètres, la longueur de l'orbite lunaire est $2\pi 60R$; la durée de la révolution de la Lune autour de la Terre étant, d'autre part, de T secondes, le quotient de $2\pi 60r$ par T est la vitesse 1020 mètres.

(2) La Lune tombe en une seconde de $1^{mm},35$ environ. Si elle pouvait être arrêtée brusquement sur son orbite, l'attraction de la Terre la précipiterait sur notre sol comme un corps pesant dont l'accélération croîtrait depuis $2^{mm},7$ jusqu'à g.

(3) L'attraction du soleil de masse M sur une planète de masse M' est $f = G\frac{MM'}{\rho^2}$, ρ étant le rayon de l'orbite de la planète. L'accélération du mouvement de la planète sur son orbite est $\gamma = \frac{f}{M'} = \frac{GM}{\rho^2}$.

Pour les diverses planètes, $\gamma\rho^2$ est *constant* comme GM. Or $\gamma = \frac{v^2}{\rho}$ (v vitesse de la planète sur son orbite) et $\gamma\rho^2 = v^2\rho = \left(\frac{2\pi\rho}{T}\right)^2 \rho$ ou $\frac{4\pi^2\rho^3}{T^2}$.

De la constance de $\gamma\rho^2$ résulte une des lois de Képler : *les carrés des temps des révolutions des planètes sont proportionnels aux cubes de leurs distances au Soleil.*

le rayon R et le rayon r étant sans effet sur A (fig. 86). De plus, comme l'attraction sur la masse m en A est la même que si la sphère active de rayon r avait sa masse transportée en O, sa valeur est $\frac{m}{r^2} \cdot \frac{4}{3} \pi r^3 \delta$ (δ densité de la Terre) proportionnelle à r; à la surface, en B, elle est égale à $\frac{m}{R^2} \cdot \frac{4}{3} \pi R^3 \delta$.

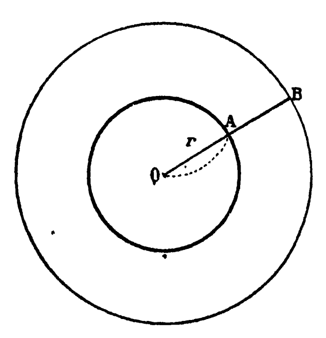


Fig. 86.

Le rapport des accélérations, égal au rapport des forces, est $\frac{r}{R}$.

91. Démonstration de la rotation de la terre par le pendule.

— Quand un pendule AB est suspendu par un fil en un point fixe A et libre de se mouvoir dans tous les sens, si on l'écarte de sa position d'équilibre dans un plan vertical quelconque et qu'on l'abandonne, il oscille dans ce plan et ***son plan d'oscillation reste invariable***. Cette invariabilité subsiste quand on fait tourner le pendule autour de sa verticale d'équilibre (1). La vérification se fait en fixant le support d'un pendule sur un plateau horizontal que l'on fait tourner autour de la verticale du fil de suspension (fig. 87).

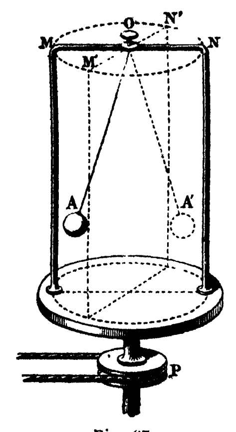


Fig. 87.

Supposons un pendule OA suspendu en O sur le prolongement de l'axe des pôles de la terre, le plan dans lequel il oscille reste invariable et la terre tourne au-dessous du pendule (fig. 88). Les différents méridiens viennent successivement rencontrer sur le sol la trace PH du plan d'oscillation du pendule. Un observateur placé en P sur un méridien PM, est entraîné par le mouvement de la terre sans en avoir conscience, il se croit fixe et comme il tourne de l'ouest à l'est, il voit la droite PH (qui est fixe dans l'espace) se déplacer en sens inverse, c'est-à-dire de l'est à l'ouest (sens de la flèche) ou dans le sens du mouvement des étoiles et décrire une circonférence complète en 24 heures. Ce déplacement apparent du plan d'oscillation du pendule démontre la rotation de la terre autour de la ligne de ses pôles.

---

(1) La constance du plan d'oscillation est conforme au principe d'indépendance des actions simultanées (**29**).

Une révolution apparente du plan d'oscillation d'un pendule en sens inverse du mouvement de la Terre s'observe encore aux différentes latitudes. L'expérience a été faite par Foucault en 1851 avec un pendule de 50 mètres de longueur installé sous la coupole du Panthéon; mais la durée de la révolution apparente du plan d'oscillation n'est plus de 24 heures comme elle le serait au pôle, elle est divisée par sin λ, λ étant la latitude du lieu.

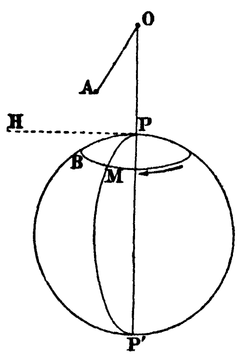


Fig. 88.

MOUVEMENTS PENDULAIRES

92. Le mouvement d'un pendule pesant est le type d'un grand nombre de mouvements oscillatoires. Tels sont les petits mouvements vibratoires des branches d'un diapason, telles sont les oscillations qu'on observe en déplaçant de leurs positions d'équilibre, soit un barreau aimanté horizontal soutenu par un fil de cocon vertical, soit un corps suspendu par un fil métallique vertical autour duquel il peut tourner.

Si les écarts de la position d'équilibre sont représentés, pour un corps oscillant, par une expression sinusoïdale $y = a \sin 2\pi \frac{t}{T}$, où a est l'amplitude maximum, la période T de l'oscillation est indépendante de l'amplitude. La mesure de la période permet, comme pour un pendule pesant, de trouver *la force* qui ramène le corps oscillant vers l'équilibre.

En ***Acoustique***, les vibrations des corps sonores; en ***Optique***, les vibrations des molécules lumineuses sont périodiques et sinusoïdales. L'étude des ***courants alternatifs*** présente aussi, en électricité, une application des mouvements oscillatoires sinusoïdaux.

Les écarts d'une molécule animée d'un mouvement vibratoire sinusoïdal, d'amplitude a et de période T, sont les projections successives sur un axe OB d'une droite OC de longueur constante a, dont l'une des extrémités O est fixe et qui tourne avec une vitesse angulaire uniforme ω, donnée par $\omega T = 2\pi$.

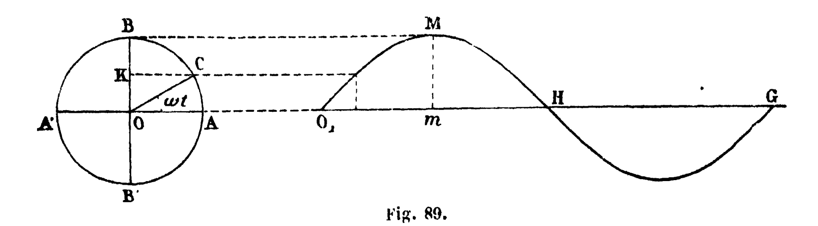


Fig. 89.

La position OA, perpendiculaire à OB, est la position de départ. Si le

mouvement se fait dans le sens ACB, C arrive en B au temps $\frac{T}{4}$, en A′ au temps $\frac{T}{2}$, en B′ au temps $\frac{3T}{4}$ et revient en A au temps T. Lorsque la droite mobile est en OC, à une distance angulaire ωt de OA, sa projection OK sur OB est égale à l'ordonnée $a \sin \omega t$ de la sinusoïde au temps t; le point M de la sinusoïde correspond à la position OB de la droite mobile; le point H à la position OA′; le point G au retour OA (fig. 89).

MOUVEMENT DES PROJECTILES.

93. Un projectile est un corps pesant lancé dans l'air avec une vitesse initiale. Si le projectile était soustrait à l'action de la pesanteur et si l'air n'offrait pas de résistance, son mouvement serait, d'après le *principe de l'inertie,* rectiligne et uniforme. Sa vitesse serait, en grandeur et en direction, la vitesse initiale. Nous ferons abstraction de la résistance de l'air. Mais, son poids lui communique une vitesse verticale de haut en bas. Conformément à *l'indépendance de l'effet d'une force et du mouvement antérieurement acquis,* le projectile sera à tout instant animé de deux vitesses : 1° la vitesse initiale, 2° la vitesse de chute.

Nous examinerons successivement les cas d'une vitesse initiale verticale, oblique, horizontale.

I. **Vitesse initiale verticale.** — Soit un projectile lancé verticalement, de bas en haut, avec une vitesse initiale v_0; son poids lui communique pendant la première seconde une vitesse g de haut en bas qui se retranche de v_0; donc, après une seconde, la vitesse est $v_0 - g$; après t secondes, elle sera $v_0 - gt$; et le mouvement est uniformément retardé (**5**).

Le projectile cessera de s'élever quand sa vitesse sera nulle, à un temps t_1 donné par l'équation : $0 = v_0 - gt_1$ d'où $t_1 = \frac{v_0}{g}$.

Quand le projectile s'arrête, il a atteint une hauteur maximum h_1.

La hauteur h du mobile, au temps t, étant $h = v_0 t - \frac{1}{2} gt^2$,

$$\text{on a } h_1 = v_0 t_1 - \frac{1}{2} g t_1^2 = \frac{v_0^2}{2g}.$$

Sa vitesse étant devenue nulle, le projectile redescend par son poids sans vitesse initiale. Sa vitesse est gt après t secondes de chute... Il prend verticalement, de haut en bas, un mouvement uniformément accéléré dont les équations sont : $v = gt$, $e = \frac{1}{2} gt^2$.

Le mobile revient au point de départ à un temps t' pour lequel $e = h_1$;

$$\text{on a } \frac{v_0^2}{2g} = \frac{1}{2} g t'^2 \text{; et } t' = \frac{v_0}{g} = t_1.$$

D'autre part $v' = gt' = g\frac{v_0}{g} = v_0$.

La durée de la descente est donc égale à la durée de la montée et la vitesse, à l'arrivée sur le sol, est égale à la vitesse initiale de bas en haut.

II. **Vitesse initiale oblique.** — Soit un projectile lancé obliquement, dans une direction OV, avec une vitesse v_0. Le projectile aura, à tout instant, une *vitesse résultante* obtenue en composant la vitesse initiale v_0 et la vitesse verticale de haut en bas que lui imprime son poids. Sa trajectoire sera donc une courbe plane contenue dans un plan vertical mené par sa vitesse initiale.

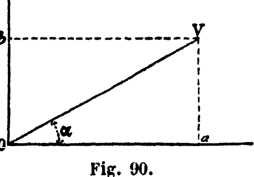


Fig. 90.

La vitesse initiale oblique v_0 peut être décomposée en deux autres simultanées (fig. 90), l'une *verticale* de bas en haut $Ob = v_0 \sin \alpha$, l'autre *horizontale* $Oa = v_0 \cos \alpha$.

La vitesse horizontale $v_0 \cos \alpha$ reste constante, tandis que la vitesse verticale a une valeur décroissante $v_0 \sin \alpha - gt$.

Coordonnées du projectile. — A un instant t, le déplacement horizontal sera $x = v_0 t \cos \alpha$; le déplacement vertical, sera

$$y = v_0 t \sin \alpha - \frac{1}{2} g t^2.$$

Le parallélogramme construit sur les deux longueurs x et y donne la position M du projectile au temps t.

Trajectoire du projectile. — En éliminant t entre les deux équations en x et y, on obtient l'équation de la *trajectoire :*

$$y = x \operatorname{tg} \alpha - \frac{gx^2}{2v_0^2 \cos^2 \alpha}.$$

Cette trajectoire est une *parabole* (fig. 91) dont l'axe est parallèle à Oy, elle est tangente à la vitesse initiale au point de départ O.

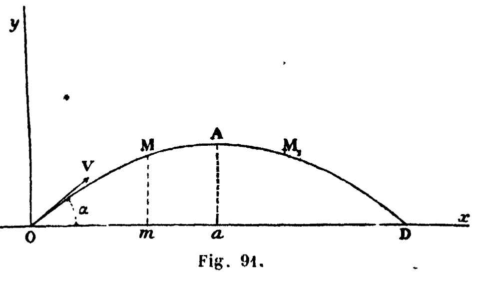


Fig. 91.

Point culminant. — La vitesse verticale s'annule à un temps t_1, tel que

$$0 = v_0 \sin \alpha - gt_1, \quad \text{d'où } t_1 = \frac{v_0 \sin \alpha}{g}.$$

Au *point culminant* A, on a $y_1 = \dfrac{v_0^2 \sin^2\alpha}{2g}$; $x_1 = \dfrac{v_0^2 \sin 2\alpha}{2g}$.

Portée. — Pour connaître la *portée* OD du projectile, on fait $y = 0$ dans l'équation de la trajectoire, on a ainsi deux valeurs de x : l'une est l'origine, l'autre est

$$x' = OD = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g} = 2x_1$$

La hauteur y_1 croît avec α, elle est maximum pour $\alpha = 90°$, c'est-à-dire pour un mobile lancé verticalement de bas en haut.

Avec une même vitesse initiale v_0, une même portée OD est obtenue pour deux inclinaisons de tir complémentaires : $\alpha = 45^\circ - \omega$ et $\alpha' = 45^\circ + \omega$. La portée est maximum pour $\alpha = 45^\circ$ et vaut alors $\frac{v_0^2}{g}$; c'est le double de la hauteur à laquelle s'élèverait le projectile lancé verticalement.

Durée. — Comme le parcours horizontal est proportionnel à t, le projectile arrive en D après un temps double de celui qu'il lui a fallu pour gagner le point culminant. Il lui faut ainsi le même temps $\frac{v_0 \sin \alpha}{g}$ pour monter et pour descendre.

Les résultats précédents s'appliquent à un projectile lancé dans le vide. La *trajectoire dans l'air,* modifiée par une résistance tangente à la trajectoire, n'a plus la forme parabolique, elle est intérieure à la parabole AM relative au vide. La partie ascendante et la partie descendante de la courbe ne sont plus symétriques par rapport à la verticale du point culminant A ; la portée ainsi que la hauteur maximum sont très diminuées, la branche descendante M′ se rapproche plus vite de la verticale (fig. 92).

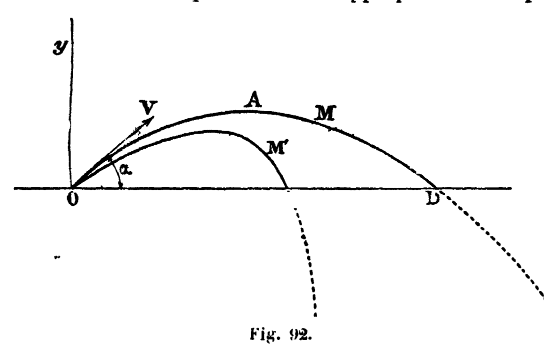


Fig. 92.

III. **Vitesse initiale horizontale.** — Le projectile est lancé horizontalement, dans une direction Ox, d'une hauteur h, avec une vitesse initiale v_0 (fig. 93). Si aucune force ne modifiait son mouvement, le projectile suivrait uniformément la direction Ox et aurait parcouru $x = v_0 t$ après un temps t. Par son poids, il parcourt en tombant un espace vertical $y = \frac{1}{2} g t^2$.

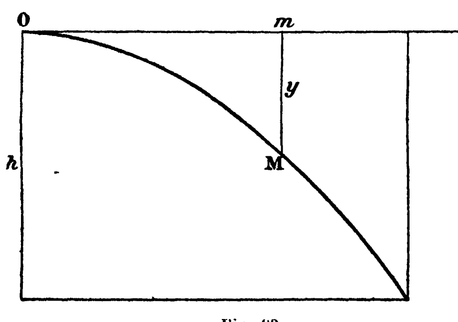


Fig. 93.

En éliminant t entre les équations en x et en y, on obtient la trajectoire $y = \frac{g x^2}{2 v_0^2}$, parabole de sommet O et de tangente Ox. La relation $h = \frac{1}{2} g t'^2$ étant indépendante de x, le temps t' où le projectile atteint le sol est le

même qu'en chute libre en partant du repos; il en résulte que deux corps pesants qui partent simultanément d'un point O, d'altitude h, l'un lancé horizontalement, l'autre tombant librement, atteignent le sol en des points différents, mais au même instant.

D'après l'équation $h = \frac{gx'^2}{2v_0^2}$, la distance $x' = v_0\sqrt{\frac{2h}{g}}$ à laquelle un projectile lancé d'une hauteur h déterminée, avec une vitesse v_0, atteint le sol, croît avec la vitesse initiale. Pour une vitesse suffisante, la courbe de tir ne rencontrerait plus le sol dont la surface est sphérique et le projectile se mettrait alors à tourner, comme la Lune, autour de la Terre.

Si un projectile, pris à une hauteur h au-dessus du sol, était lancé horizontalement avec une vitesse v_0 suffisante pour décrire une circonférence autour de la Terre, son accélération centripète $\frac{v_0^2}{R}$ serait égale à g. On aurait $v_0 = \sqrt{Rg}$. En prenant approximativement R = 6.400.000 mètres et $g = 10$ mètres, on a $v_0 = 8000$ mètres (1).

BALANCE

94. Mesure des masses et des poids. — La balance est un instrument qui sert à *peser* les corps, c'est-à-dire à comparer leurs poids au poids du gramme. Avec une balance, on compare le poids d'un corps au poids de blocs de laiton ou de platine gradués en grammes (*poids marqués*) et contenus dans une *boîte de poids* (2).

Un corps est dit peser 10 grammes, s'il a le même poids que le bloc marqué 10 grammes dans une boîte de poids. Une masse étant représentée par le même nombre que son poids en grammes (**30**), la masse du corps précédent vaut 10 unités de masse. Une balance détermine donc le poids en grammes ou la masse d'un corps. Dans le langage usuel, *poids* signifie poids en grammes.

Si deux corps exercent le même effort sur un plateau de balance, ils ont *en tout lieu* même poids et même masse, car d'après les relations : $p = mg$, et $p' = m'g$, si on a *en un même lieu*, $p = p'$, on a aussi $m = m'$, quel que soit g.

95. Description d'une balance. — Une balance (fig. 94) se

---

(1) Cette valeur de v_0 est calculée en négligeant la résistance de l'air. Cette résistance n'existe pas pour la lune qui se meut dans le vide.

(2) Une boîte de poids se compose des masses suivantes :

1 2 2 5 10 10 20 50 100 100 200 500

On peut former avec ces douze masses toute masse entière comprise entre 0 et 1000.

compose d'un levier rigide AC, appelé fléau, mobile en son milieu autour d'un axe horizontal.

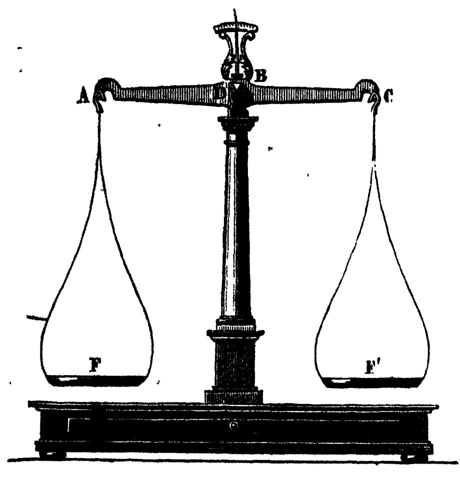
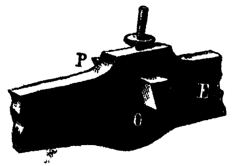


Fig. 94.

Le fléau porte à ses extrémités deux *plateaux* égaux F et F', librement suspendus, destinés à recevoir le corps à peser et les poids.

Suspension du fléau et des plateaux. — L'axe de rotation ou de suspension du fléau est formé par l'arête vive O d'un prisme triangulaire P, en acier très dur, appelé *couteau*, qui traverse le milieu du fléau E (fig. 95). Cette arête s'appuie sur deux petits plans d'acier ou d'agate x et y situés dans un même plan horizontal, l'un en avant, l'autre en arrière du fléau et supportés par une colonne verticale.



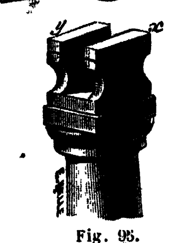


Fig. 95.

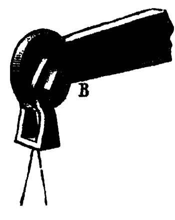


Fig. 96.

Chacun des plateaux repose par un crochet sur un couteau horizontal en acier B, fixé à chaque extrémité du fléau. Les arêtes vives de ces couteaux, parallèles à l'arête du couteau central, sont tournées vers le haut (fig. 96). Ce mode de suspension est assez mobile pour que le centre de gravité du système formé par le plateau et la charge se place sur la verticale qui passe par l'arête de suspension; dans ces conditions, *le poids d'un plateau et sa charge* constituent toujours, quelle que soit l'inclinaison du fléau et quelle que soit la position du corps sur le plateau, *une force verticale appliquée sur le tranchant du couteau correspondant,* à une distance invariable de l'axe central.

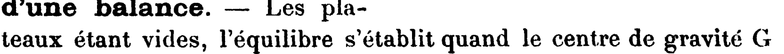
Ligne du fléau, bras du fléau. — Soient a, O et b les points de suspension ou les intersections des arêtes des couteaux par un plan

perpendiculaire à ces arêtes en leurs milieux (fig. 97), la ligne *ab* est la *ligne du fléau*. Les distances horizontales de *a* et *b* à la verticale du point O sont les *bras du fléau*.

Lorsque les bras du fléau sont *égaux*, si les plateaux ont des poids *égaux*, leur résultante passe toujours en O et ne fait qu'appuyer le fléau sur son support, quelle que soit l'inclinaison du fléau.

Fig. 97.

96. Fonctionnement d'une balance. — Les plateaux étant vides, l'équilibre s'établit quand le centre de gravité G



s'est placé sur une verticale passant par l'axe de suspension; le poids de l'appareil entier est alors détruit par la résistance du support.

Si l'on met une charge *p* dans l'un des plateaux, le fléau s'incline en *a'b'*, le centre de gravité G du fléau quitte la verticale de l'axe de suspension et vient en G', *le poids du fléau qui lui est appliqué tend à le ramener dans sa position première;* dans un nouvel équilibre, la résultante de la charge *p* et du poids ϖ du fléau passe par l'axe O de suspension (fig. 98).

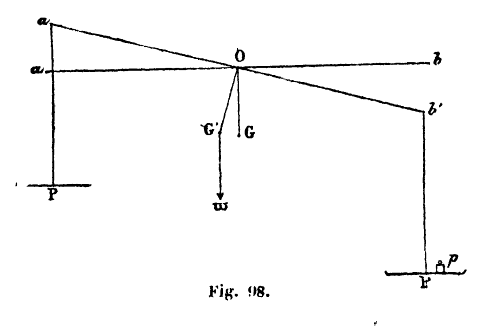


Fig. 98.

Stabilité d'une balance. — Une condition indispensable à remplir par une balance est la stabilité de l'équilibre (**79**). Pour cela, le centre de gravité G du fléau doit être au-dessous de l'axe de suspension. Si le centre de gravité du fléau était situé au-dessus de cet axe, l'équilibre serait instable, car le poids du fléau se joindrait à la surcharge pour faire basculer la balance (fig. 99).

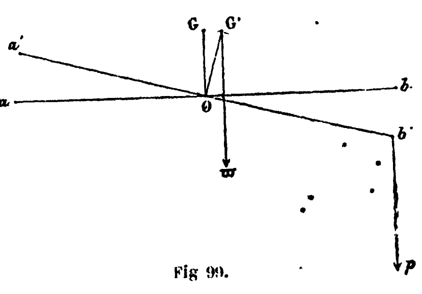


Fig 99.

La balance serait *folle,* la moindre trépidation ferait incliner le fléau de 90°.

Si le centre de gravité est situé sur l'axe de suspension, le poids du fléau est toujours annulé par la résistance de l'axe. Dans ce cas, la balance vide est en équilibre *indifférent* dans toutes les positions, et le fléau s'incline complètement pour toute surcharge.

97. Justesse d'une balance. — *Une balance est* **juste** *si le fléau reste horizontal quand on met des poids égaux dans les deux plateaux,* ou lorsque, ayant établi l'équilibre avec des charges, l'équilibre subsiste quand on intervertit les charges (1).

L'horizontalité du fléau se reconnaît par une aiguille *f* fixée perpendiculairement à la ligne du fléau et dont l'extrémité parcourt un petit arc de cercle divisé CC'. Quand la ligne du fléau est horizontale, l'aiguille pointe sur le zéro (fig. 97).

Le fléau étant, par construction, *symétrique* par rapport au point O, et les plateaux *ayant le même poids,* la ligne du fléau est horizontale à plateaux vides. Si l'horizontalité n'est pas alors parfaite, une petite surcharge fixe placée d'un côté permet de l'obtenir.

Conditions de justesse. — Une balance est *juste,* si *les bras du fléau sont égaux.* En effet, l'équilibre horizontal établi avec les plateaux vides, subsiste avec des poids égaux dans les plateaux, si ces plateaux sont suspendus à la même distance de l'axe, car alors la résultante des deux poids passe par l'axe de suspension.

98. Méthodes de pesées. — **Simple pesée.** — Dans la pesée usuelle du commerce, on place dans un des plateaux le corps à peser. On met dans l'autre plateau des poids marqués jusqu'à ce que le fléau redevienne horizontal. Si la balance est juste, la masse du corps est lue sur les poids.

Double pesée. — Il est difficile de réaliser rigoureusement la justesse, c'est-à-dire l'égalité des bras du fléau; on obtient toutefois des pesées très précises par la méthode de la *double pesée* due à Borda. Elle consiste à placer le corps dans l'un des plateaux et à lui faire équilibre dans l'autre avec de la grenaille de plomb, ce qui s'appelle *faire la tare.* Sans toucher à la tare, on remplace le corps par des poids marqués pour obtenir l'équilibre. Les poids et le corps ont exercé successivement le même effort, ils ont par conséquent le même poids et la même masse.

Double pesée à charge constante. — Pour faire une série de mesures

(1) Cette opération vérifie en même temps l'égalité des poids.

avec une sensibilité constante, on opère *sous charge fixe*. A cet effet, on met dans le plateau A un poids marqué égal au poids maximum à évaluer et on en fait la tare dans le plateau B. On place ensuite un des corps à peser dans le plateau A; les poids à enlever du même côté pour rétablir l'horizontalité représentent le poids du corps. Cette méthode réduit au minimum le nombre des équilibres à établir.

99. Conditions de sensibilité d'une balance. — Puisque la double pesée dispense de rechercher une justesse absolue, la qualité la plus importante d'une balance est la *sensibilité*.

Une balance est dite **sensible** *au milligramme* quand une surcharge d'un milligramme dans un plateau fait incliner le fléau d'une façon appréciable.

Considérons une balance dont l'axe de suspension du fléau est parfaitement mobile et dont *les trois arêtes de suspension du fléau et des plateaux sont dans un même plan.*

L'équilibre horizontal ayant été établi à vide, puis avec des poids, les poids ont une résultante qui passe en O et est détruite par la résistance du support; elle passera encore en O *après l'inclinaison du fléau*. On pose dans l'un des plateaux une *surcharge p*, le fléau s'incline en a' b', le centre de gravité G du fléau vient en G'. Les deux seules forces qui agissent sont la surcharge p appliquée en b' et le poids ϖ du fléau appliqué en G'. Quand un nouvel équilibre est établi, pour un angle d'inclinaison α, ces deux forces ont une résultante qui passe par l'axe de suspension O (fig. 100).

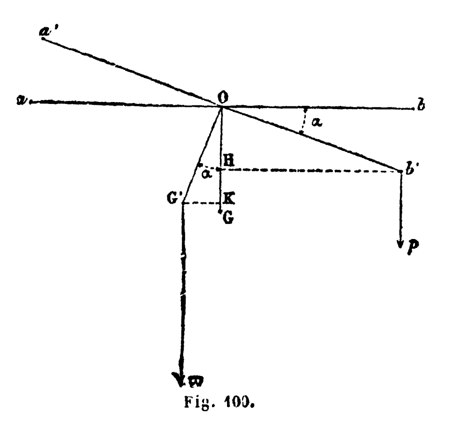


Fig. 100.

Désignons par d la distance OG = OG', par l la distance Ob'.

Abaissons de G' et b' des perpendiculaires sur la verticale qui passe en O; on a $G'K = d \sin \alpha$; $b'H = l \cos \alpha$.

La résultante des deux forces doit se trouver sur OG, et, d'après la règle de la composition de deux forces parallèles : $p.b'H = \varpi.G'K$,

$$\text{ou } pl \cos \alpha = \varpi\, d \sin \alpha, \qquad \text{d'où } \operatorname{tg} \alpha = \frac{pl}{\varpi d}.$$

La sensibilité est 1° *indépendante de la charge*, puisque $tg\alpha$ n'en

dépend pas ; 2° *proportionnelle à la surcharge p ;* 3° *proportionnelle à la longueur l* des bras du fléau ; 4° *en raison inverse de* ϖ, c'est-à-dire augmente quand le poids du fléau diminue ; 5° *en raison inverse de d,* ou d'autant plus grande que le centre de gravité du fléau est plus voisin de l'axe de suspension.

100. Construction d'une balance. — On cherche à réaliser les conditions suivantes :

Axes de suspension du fléau et des plateaux, ou arêtes des trois couteaux, parallèles et dans un même plan horizontal (la sensibilité est alors indépendante de la charge) ;

Bras du fléau rigoureusement égaux (pour la justesse) ;

Bras du fléau longs et légers ; centre de gravité du fléau au-dessous de l'arête du couteau central, mais très voisin de cette arête (pour la sensibilité).

Afin de diminuer le poids du fléau et accroître sa longueur, conditions qui paraissent incompatibles, on forme le fléau d'une lame métallique placée de champ et ayant la forme d'un losange *évidé*, ce qui augmente la légèreté sans compromettre la résistance à la flexion.

On relève ou on abaisse le centre de gravité du fléau en faisant monter ou descendre un écrou taraudé *e*, mobile sur une tige filetée verticale qui surmonte le fléau (fig. 101).

Balance de précision (fig. 101). — Une balance de précision est renfermée dans une cage de verre, qui la protège contre les poussières et contre l'agitation de l'air au moment de la pesée. Pour que les poids marqués ne s'altèrent pas au contact d'un air humide, l'air intérieur de la cage est desséché avec de la chaux vive et on n'ouvre les portes de la cage que pour introduire des poids. Les poids sont manœuvrés avec une pince.

Un support *g* ayant la forme d'une fourche, et mis en mouvement par un bouton B extérieur à la cage, permet de soulever les plateaux et le fléau quand la balance ne fonctionne pas, ce qui empêche l'usure des arêtes des couteaux et de leurs plans d'appui. On soulève le fléau toutes les fois que, dans une pesée, on met un poids sur un plateau ou qu'on l'ôte.

On construit couramment des balances de précision sensibles au milligramme pour une charge d'un kilogramme [2].

(1) La sensibilité n'est théoriquement indépendante de la charge que si les trois arêtes de suspension sont dans un même plan, ou les trois points *a*, O et *b* en ligne droite ; mais, même dans ce cas, la sensibilité dépend encore de la charge, par suite de la flexion du fléau et des variations de frottement aux points de suspension.

(2) On est arrivé jusqu'à 100 kilos pesés à un milligramme près.

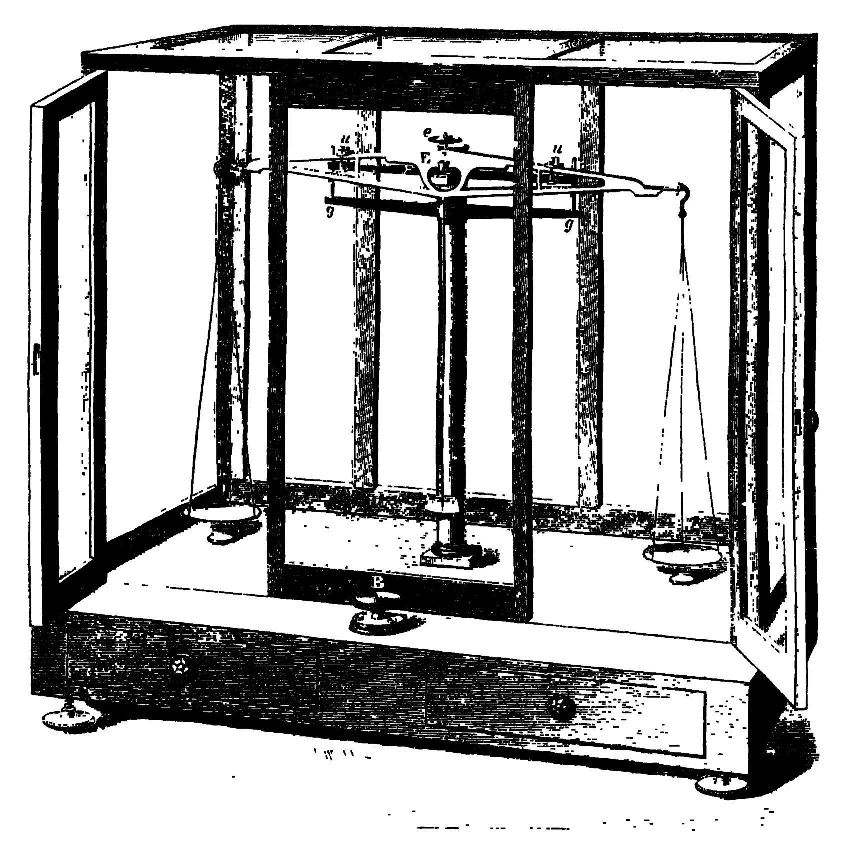


Fig. 101.

Pour effectuer une pesée précise, on règle d'abord la balance :

1° On rend sa base horizontale à l'aide des vis calantes. L'horizontalité est indiquée par un niveau à bulle d'air.

2° On surcharge le plateau le plus léger avec un fil de platine, pour faire coïncider l'extrémité de l'aiguille avec le zéro de la graduation.

3° On déplace l'écrou mobile dans la tige filetée du milieu du fléau, de façon à obtenir une durée d'oscillation de 5 à 6 secondes.

Puis on procède à la double pesée. L'équilibre définitif correspond à des oscillations symétriques de l'aiguille autour du zéro.

Balance à cavaliers. — Pour rendre plus rapides les opérations terminales, on se sert de cavaliers.

Le fléau porte une règle horizontale sur laquelle, à l'aide d'une tige manœuvrée en dehors de la cage, on peut descendre doucement un fil de platine appelé *cavalier*. La règle est divisée en 10 parties égales de part et d'autre du milieu du fléau. Descendu sur la division 10, un cavalier de 1 milligramme agit comme 1 milligramme posé sur le plateau ; descendu sur la division 4, il agit comme quatre dixièmes de milligramme.

101. Balance hydrostatique. — C'est une balance dans laquelle le plan d'acier qui supporte le couteau du fléau s'élève et s'abaisse à volonté, à l'aide d'une crémaillère (fig. 124). Des crochets placés au-dessous des plateaux permettent d'y suspendre un corps qu'on peut plonger dans un liquide.

102. Balance de Roberval. — Les plateaux P, au lieu d'être suspendus au-dessous du fléau AB, sont posés sur les extrémités des bras du fléau (fig. 102).

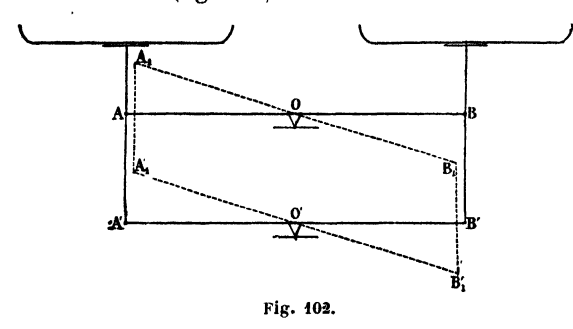


Fig. 102.

Les tiges qui supportent les plateaux sont assujetties à rester verticales et les plateaux restent horizontaux. Articulées en A et B aux extrémités du fléau AB, elles se prolongent en A′ et B′ et s'articulent aux extrémités d'un second fléau A′B′. Les deux fléaux oscillent autour des couteaux de suspension O et O′. Dans ces oscillations, le parallélogramme AA′B′B se déforme, mais les articulations fonctionnent de telle façon que les côtés AA′ et BB′ se maintiennent verticaux. On démontre que les poids et les corps agissent comme s'ils étaient aux centres mêmes des plateaux, sans que leur position sur les plateaux influe sur l'équilibre.

103. Bascule. — La bascule est une balance dont les *deux bras du fléau sont inégaux*. Le fléau ayant été établi horizontal à plateaux vides, si le bras du plateau qui reçoit les poids est 10 fois plus long que le bras du plateau qui reçoit le corps à peser, un poids de 10 kilogrammes fera équilibre à 100 kilogrammes. La bascule permet de peser de lourdes charges avec des poids peu encombrants.

Balance romaine. — La balance romaine n'exige pas de poids marqués. Son fléau a des bras inégaux (fig. 103). L'axe de suspension est soutenu par un anneau. L'extrémité du court bras de levier AB, est munie d'un crochet qui porte l'objet à peser. Un *poids mobile* invariable P peut glisser le long de l'autre bras AO. Le fléau

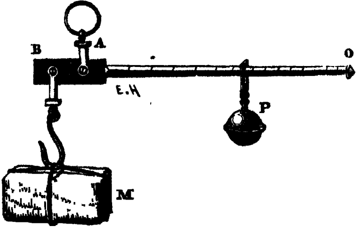


Fig. 103.

est équilibré de façon à être horizontal en l'absence du poids P et du corps à peser. Ayant suspendu l'objet au crochet, on fait glisser P le long du bras AO jusqu'à ce que le fléau redevienne horizontal. Si la distance du poids P à l'axe de suspension vaut 10 fois AB, l'objet à peser est 10 fois plus lourd que le poids P.

Une graduation a été faite en suspendant au crochet des poids connus ; des divisions tracées sur le bras AC marquent les positions où le poids P fait équilibre à 1, 2, 3... kilogrammes.

POIDS ABSOLU D'UN CORPS

104. Invariabilité de la masse. — Si un corps exerce sur le plateau d'une balance le même effort qu'un poids marqué M grammes, l'*égalité d'effort* subsistera en tous les points du globe et la masse sera trouvée partout égale à M.

Variabilité du poids. Poids absolu. — Un dynamomètre, c'est-à-dire un ressort, n'est pas comme la balance un instrument de comparaison ; il éprouve une déformation qui change avec la force qu'on fait agir sur lui et qui est *indépendante du lieu* où l'on se trouve. Un dynamomètre mesure, *en dynes*, l'effort exercé par un corps pesant pour tomber, ou le *poids absolu.*

Le poids absolu P d'un corps est égal à son poids en grammes M multiplié par g (**86**). Le poids en grammes M est invariable, mais comme g varie avec l'altitude et la latitude, un poids absolu Mg varie avec la localité où on le détermine.

DENSITÉS

105. Densités; poids spécifiques. — Tous les corps n'ont pas la même masse sous un même volume. La masse d'un corps homogène étant, comme son poids, proportionnelle à son volume, la *densité* ou *masse spécifique d'un corps homogène est sa masse par unité de volume.* La densité d'une substance est le poids en grammes d'un centimètre cube [1] de cette substance. D étant la densité d'un corps, V son volume, sa masse est exprimée par $M = VD$.

(1) Le volume d'un corps variant avec la température, la masse de l'unité de volume d'un corps n'est déterminée que si on indique sa température.

En prenant pour unité de longueur le centimètre et pour unité de masse le gramme, la densité de l'eau pure à 4^0 est égale à l'unité, car la masse et le volume d'un centimètre cube d'eau sont à 4^0 égaux à l'unité, et la relation $M = VD$ où $V = 1$ et $M = 1$ donne $D = 1$. La densité du mercure à 0^0 est 13,59.

On appelle *poids spécifique* d'une substance le poids en dynes ou le poids absolu d'un centimètre cube de cette substance : le poids spécifique d'un corps de densité D est Dg.

La densité d'un corps est invariable, mais son poids spécifique varie, comme g, avec le lieu de l'observation. La densité de l'eau à 4^0 est partout égale à 1 ; son poids spécifique à Paris est 981 dynes. Le poids spécifique à Paris du mercure à 0^0 est 13,59.981. Les densités et les poids spécifiques sont distincts, mais en un même lieu, les poids spécifiques (Dg et $D'g$) sont proportionnels aux densités.

UNITÉS

Anciennes unités. — Les unités des diverses grandeurs étaient autrefois indépendantes les unes des autres. En France, la *toise* était l'unité de longueur, la *perche* l'unité de mesure agraire, la *livre* l'unité de poids, le *setier* l'unité de capacité [1].

Le *système métrique décimal,* actuellement en usage, est un ensemble d'unités qui dépendent d'une unité de longueur, le mètre.

106. Relations entre les unités. — Les grandeurs que l'on étudie en géométrie, en mécanique, ou en physique, sont liées par des relations qui permettent de définir toutes les unités avec *trois unités seules arbitraires* et dites **unités fondamentales** ; les autres unités sont des **unités dérivées**. Les unités fondamentales se rapportent à l'espace, à la matière et au temps.

En géométrie, l'unité de longueur est seule nécessaire, car les unités de surface et de volume s'en déduisent.

En mécanique, s'introduisent les unités de masse et de temps. Les grandeurs mécaniques sont évaluées à l'aide de trois unités. Les phénomènes physiques peuvent être mesurés par les mêmes unités que les effets mécaniques qu'ils déterminent.

---

(1) A Paris la toise valait 1,949 mètres, la perche des eaux et forêts 51,07 mètres carrés, la livre 0,489 kilogramme, le setier 156 litres. Les unités variaient avec la province.

SYSTÈME D'UNITÉS ADOPTÉ EN PHYSIQUE

107. Unités fondamentales. — Les unités fondamentales adoptées sont les unités de *longueur*, de *temps* et de *masse*.

Unité de longueur. — L'unité de longueur est le *centimètre*, centième partie du mètre. Le *mètre* est la distance qui sépare, à la température de la glace fondante, deux traits de repère tracés sur une règle en platine iridié (90 de platine et 10 d'iridium) conservée, comme *étalon* ou représentation matérielle, au Bureau international des Poids et Mesures de Sèvres. (Le mètre est voisin de la quarante-millionième partie de la longueur du méridien terrestre.)

Unité de temps. — L'unité de temps est la *seconde*. La seconde est la 86 400e partie du jour solaire moyen (1).

Unité de masse. — C'est la masse d'un *gramme* (2) ou la millième partie de la masse d'un bloc de platine conservé au Bureau international des Poids et Mesures (égal à la masse d'un décimètre cube d'eau pure à 4°).

En raison du choix des unités fondamentales, ce système d'unités est dit **système centimètre, gramme, seconde** (ou C. G. S.).

108. Unités dérivées. — Les grandeurs géométriques, mécaniques, physiques, sont liées entre elles par des définitions ou par des lois traduites en équations; ces équations renferment des coefficients numériques que l'on rend égaux à l'unité par le choix des unités dérivées.

L'unité de surface est le centimètre carré (2). **L'unité de volume** est le centimètre cube.

L'unité de vitesse est la vitesse d'un corps qui parcourt d'un mouvement uniforme un centimètre en une seconde. **L'unité d'accélération** est l'accélération d'un mouvement uniformément varié, dont la vitesse s'accroît d'un centimètre par seconde.

Unité de force. — Entre une masse M et la force qui lui communique une accélération γ, existe la relation $F = M\gamma$ (**30**).

---

(1) La durée du *jour solaire vrai* ou du temps qui sépare deux passages consécutifs du soleil au méridien éprouve de petites variations périodiques. On a imaginé un soleil fictif passant au méridien à des intervalles de temps égaux à la moyenne de tous les jours solaires vrais de l'année. Cet intervalle est le *jour solaire moyen*. $86400 = 24.60.60$.

(2) Dans une équation qui n'est pas une équation de définition, il entre des coefficients numériques qui peuvent différer de l'unité. Tandis que la surface d'un carré de côté l est l^2, la surface d'un triangle de base b et de hauteur h est $\frac{1}{2}bh$. Le volume d'une sphère de rayon r est $\frac{4}{3}\pi r^3$.

D'après cette relation, l'unité de force ou **dyne** est une force qui communique à une masse de 1 gramme l'unité d'accélération par seconde. Le poids d'un gramme à Paris, d'après la relation $P = Mg$, communique, en chute libre, à la masse d'un gramme une accélération de 981 centimètres ; il vaut 981 dynes. En un lieu où l'accélération de la pesanteur vaut g centimètres, le nombre g représente en dynes le poids d'un gramme (**86**).

Unité de travail. — D'après la relation $T = Fe$, on prend pour unité de travail ou d'énergie le travail effectué par une unité de force qui déplace son point d'application de l'unité de longueur dans la direction de la force : c'est le travail d'une dyne déplaçant son point d'application d'un centimètre. Cette unité s'appelle **erg**.

Le **travail** est l'élément industriel le plus important ; il **fixe**, avec la matière première, le prix d'un objet fabriqué. Cependant, en raison de l'importance du temps, on note aussi le temps pendant lequel un travail est effectué et on appelle **puissance** d'une machine son travail mécanique par seconde. Un travail est une puissance multipliée par un temps. **L'unité de puissance** est la puissance d'une machine qui fournit un erg par seconde.

Unité de pression. — Un liquide ou un gaz, enfermé dans un récipient, presse sur les parois. Sur une portion S de surface découpée sur la paroi, il faut exercer une force P pour la maintenir en place. Si la pression est uniforme, on peut poser $P = pS$; p étant la pression par unité de surface. On a donc $p = \frac{P}{S}$. L'unité de pression par unité de surface, ou *barye*, est la pression d'une dyne par cm^2 ; une *mégabarye* (1) vaut un million de baryes.

Unité de densité. — D'après la relation $M = VD$, l'unité de densité est la densité d'un corps dont la masse par centimètre cube est la masse d'un gramme. C'est la densité de l'eau à 4^0.

Nous définirons plus tard les autres unités dérivées, à propos des grandeurs qu'elles servent à mesurer.

109. Unités pratiques. — Un même système d'unités pour toutes les grandeurs, conduit souvent dans les mesures à des nombres trop grands ou trop petits. Pour cette raison, on a adopté des unités secondaires dites *pratiques*, qui sont, sauf pour les temps et les angles, des multiples ou sous-multiples *décimaux* des unités fondamentales et des unités dérivées.

---

(1) Le préfixe *méga* signifie un million, le préfixe *micro* désigne un millionième.

La dyne est une unité très petite. La mégadyne (10^6) dépasse un peu, à Paris, le poids d'un kilogramme.

Vu l'extrême petitesse de l'erg, on prend habituellement pour unité de travail le joule. Le **joule** vaut dix millions d'ergs (10^7).

L'unité pratique de puissance est le **watt**, puissance d'une machine qui effectue un travail d'un joule par seconde.

UNITÉS DE LA MÉCANIQUE INDUSTRIELLE

110. Unités fondamentales. — En mécanique, on prend souvent pour unités fondamentales une unité de *longueur*, une unité de *temps* et une unité de *force*.

Unité de longueur. — On adopte le mètre.

Unité de temps. — On prend la seconde du jour solaire moyen.

Unité de force. — L'unité de force est le *kilogramme-poids* ou le *poids* du bloc de platine qui a servi à définir l'unité de masse dans le système d'unités adopté en Physique. C'est aussi le poids d'un décimètre cube d'eau distillée à 4°. L'unité de pression est le kilogramme ou encore une atmosphère par centimètre carré.

111. Unités dérivées. — L'**unité de surface** est le mètre carré, l'**unité de volume** est le mètre cube.

L'unité de vitesse est la vitesse d'un corps qui parcourt d'un mouvement uniforme 1 mètre en une seconde; l'**unité d'accélération** est l'accélération d'un mouvement uniformément varié dont la vitesse varie de 1 mètre par seconde.

Unité de masse. — D'après la relation $F = M\gamma$, l'unité de masse est la masse d'un corps qui prend une accélération d'un mètre sous l'action d'une force d'un kilogramme. Cette masse pèse 9 kg. 81, car cette masse prend à Paris, sous l'action d'un kilogramme seulement, une accélération 9,81 fois plus petite que l'accélération que lui communique son propre poids (un mètre au lieu de $9^m,81$).

Unité de travail. — D'après la relation $T = Fe$, on choisit pour unité de travail le **kilogrammètre**, travail effectué par un kilogramme-poids déplaçant son point d'application d'un mètre.

Ces unités de force, masse, travail, éprouvent des variations, suivant le lieu de l'observation; ces variations sont *trop petites* pour qu'on s'en préoccupe dans les *mesures industrielles.*

D'ailleurs, ces unités deviennent bien déterminées si l'on prend pour unité de force la *valeur du kilogramme-poids à Paris.* L'unité de masse devient alors, en tout lieu, la masse de 9,81 décimètres

cubes d'eau et l'unité de travail est le kilogrammètre de Paris. Il vaut 1000.981.100 = $9{,}81.10^7$ ergs ou 9,81 joules.

Unité de puissance. — L'unité de puissance industrielle est habituellement le **cheval-vapeur**, puissance d'une machine qui produit 75 kilogrammètres par seconde. Dans l'industrie électrique, l'unité de puissance mécanique est le watt (**109**), qui vaut à peu près un dixième de kilogrammètre par seconde. Un cheval-vapeur vaut 736 watts. Un kilowatt-heure est le travail effectué en une heure par une machine d'un kilowatt.

Remarques sur les systèmes d'unités. — Nos systèmes d'unités ont eu pour point de départ commun le *système métrique.*

Dans le système métrique établi en France en 1795, à part l'unité de temps, il n'y avait en apparence qu'une unité indépendante, l'*unité de longueur,* le **mètre.** Les autres unités s'en déduisaient :

1° par des définitions géométriques (unité de surface, de volume) ;

2° par une définition *arbitraire* (unité de force : poids à Paris d'un décimètre cube d'eau à 4° dans le vide). L'*unité de force* jouait le rôle de seconde unité fondamentale.

Avec la *seconde* comme *unité de temps,* on a les trois unités fondamentales de la mécanique industrielle.

Le système actuel de la physique (système CGS), indépendant de la pesanteur, a été adopté par le Congrès international des électriciens de 1881.

HYDROSTATIQUE

112. Fluides. — Un fluide est un corps dont les particules ont très peu de cohésion et *se déplacent très facilement* (1) *les unes par rapport aux autres.* Il prend la forme du vase qui le renferme. Son centre de gravité n'a donc pas une position invariable comme dans un solide. Un fluide est parfaitement élastique, diminue de volume quand on le comprime, mais reprend son volume primitif si la compression cesse.

Liquides. — Un liquide est un fluide très peu compressible, limité dans un vase par une surface libre. Souvent les liquides sont appelés *fluides incompressibles* et les gaz *fluides compressibles.*

L'hydrostatique est l'étude de l'équilibre des liquides.

113. Pressions exercées par les solides. — Un solide

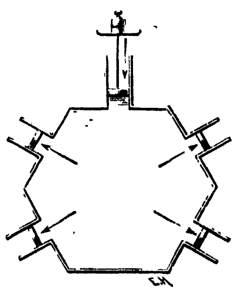
(1) Un fluide parfait se déforme sans dépense de travail.

pesant, posé sur une surface plane, exerce un effort appelé pression. Cet effort varie avec la base du solide; il se répartit sur un grand nombre de centimètres carrés si la base est étendue, *la pression par centimètre carré* est notable si la base est étroite. Aussi les statues lourdes sont-elles appuyées sur le sol par un large socle; pour enfoncer un clou dans une planche, on le termine en pointe.

S'il s'agit d'une pression exercée du dehors sur une portion de surface d'un corps solide, *elle se transmet inégalement sur des surfaces égales* prises dans diverses directions, à cause des liaisons qui donnent au solide sa rigidité.

114. Transmission d'une pression dans un liquide. — Dans un liquide, une pression se transmet également en tous sens. L'hydrostatique repose sur le principe de la transmission des pressions ou **principe de Pascal**. Voici son énoncé : *Si, sur une portion plane de la surface d'un liquide, parfaitement fluide et enfermé de tous côtés, on exerce une pression, cette pression se transmet intégralement à toute surface plane égale de la paroi ou de l'intérieur du liquide, quelle que soit son orientation.*

Ce principe résulte de la fluidité parfaite des liquides et s'appliquerait à des liquides soustraits à l'action de la pesanteur.


Fig. 104.

Concevons un vase de forme quelconque rempli de liquide et portant des tubulures fermées par des pistons (fig. 104). Une pression p exercée normalement du dehors sur un centimètre carré d'un piston se transmet intégralement sur chaque centimètre carré de la surface intérieure de chacun des pistons. Si les pistons ont la même surface s, l'équilibre n'a lieu que si on exerce sur tous, du dehors, des pressions égales à ps. Sur un piston de surface S, il faudra une pression extérieure pS pour maintenir l'équilibre.

Les pressions qui se font équilibre sur des surfaces s et S, sont donc ps et pS, *proportionnelles aux surfaces;* c'est le principe de la presse hydraulique qui sert à exercer un effort considérable avec une force faible.

Presse hydraulique. — La presse hydraulique est formée de deux corps de pompe, de sections très inégales s et S, réunis par un

tube (fig. 105). Dans chacun des corps de pompe glisse un piston. Un petit effort ps appliqué sur s transmet à S un effort pS qui est 50 fois plus grand, si $S = 50s$.

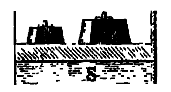


Fig. 105.

LIQUIDES PESANTS

115. Un liquide pesant renfermé dans un vase se place au fond du vase et offre une **surface** supérieure **libre**.

Horizontalité de la surface libre. — La surface libre d'un liquide pesant en équilibre est *plane*, car elle réfléchit la lumière comme un miroir plan, en donnant des images symétriques des objets. Nous avons vu qu'elle est *horizontale* ou perpendiculaire, en chaque lieu, à la direction de la pesanteur (**68**).

Cette horizontalité résulte de la fluidité du liquide. Décomposons, en effet, le poids d'une molécule telle que M (fig. 105) en deux composantes, l'une perpendiculaire et l'autre parallèle à la surface libre; la composante perpendiculaire MR n'a d'autre effet que de presser les molécules sous-jacentes sans les déplacer puisque le liquide est incompressible; si la surface libre n'était pas horizontale, la *composante parallèle* MN ferait glisser la molécule le long de la surface et l'équilibre n'existerait pas. L'équilibre exige donc que la force soit *normale à la surface libre*.

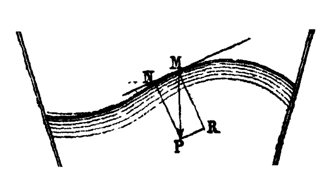


Fig. 106.

La surface libre d'un liquide supporte une pression uniforme, exercée par l'atmosphère. Cette pression est nulle dans le vide.

L'équilibre d'un liquide dans des vases communiquants (**132**), dans le niveau d'eau et dans le niveau à bulle d'air résulte directement de l'horizontalité de la surface libre.

116. Pressions intérieures. — Dans un liquide pesant, le poids des couches supérieures se transmet, comme toute pression, aux couches inférieures, et des surfaces égales, prises dans le liquide, à des hauteurs différentes, supportent des pressions inégales.

Pression sur un élément plan horizontal à l'intérieur d'un liquide. — Considérons un vase *cylindrique* renfermant un

liquide (fig. 107). La pression sur une tranche horizontale AB, de surface S et de profondeur *h*, est égale au poids de la colonne liquide comprise entre la surface libre et cette tranche : c'est S*h*D*g* ou S*h*δ (1) (les parois du vase se tapissent d'une couche liquide *extrêmement mince* qui y reste fixée et contre laquelle le reste du liquide glisse sans frottement).

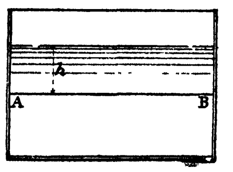


Fig. 107.

La pression est la même sur des surfaces égales de la tranche S; sur l'unité de surface elle est *h*δ et, sur une surface *s*, elle est *sh*δ.

Dans un vase cylindrique, la pression sur un élément de surface d'une tranche horizontale intérieure est ainsi égale au ***poids d'une colonne liquide qui a pour base l'élément et pour hauteur sa distance au niveau libre;*** elle est la même que si le filet cylindrique, qui a *s* pour base et *h* pour hauteur, était isolé du reste du liquide.

Quelle que soit la forme du vase, ***nous admettrons*** que la pression sur un élément horizontal *s* situé à une profondeur *h* est constamment *sh*δ. Dans un vase de forme évasée (fig. 108), la pression sur l'élément *ab* est exercée directement par le filet qui s'appuie sur l'élément. Dans un vase rétréci à la partie supérieure (fig. 109), la pression est la même, *comme nous l'avons admis,* sur deux éléments *ab* et *cd*, égaux, de même niveau; en *cd* la pression est exercée directement par un filet de poids *sh*δ; en *ab*, elle est exercée indirectement par transmission.

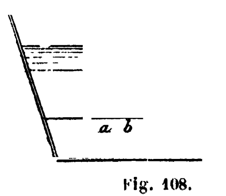


Fig. 108.

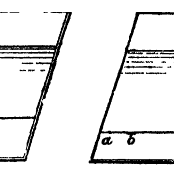


Fig. 109.

Pression de bas en haut. — Si une surface liquide *s*, située dans un plan horizontal, supporte *de haut en bas,* le poids d'une colonne *sh*δ, elle doit, en vertu de l'équilibre, supporter *de bas en haut* une pression égale et contraire, sans quoi elle se déplacerait.

Pression sur une surface solide. — Dans un liquide, une surface solide qui occupe la position d'une surface liquide, éprouve les mêmes pressions, puisque ces pressions ne proviennent que du liquide qui appuie sur la surface. Voici comment on le vérifie.

Un disque de verre poli, très léger, *ab*, appelé *obturateur,* est tenu

(1) D*g* ou δ, poids spécifique du liquide.

par un fil et appliqué contre un cylindre de verre T dont la base est rodée à l'émeri (fig. 110); le cylindre étant plongé dans l'eau, le disque de verre se trouve maintenu contre le cylindre sans qu'on ait à tendre le fil. On verse alors dans le cylindre de l'eau légèrement teintée, le disque se détache par son poids, quand il éprouve une même pression à l'intérieur et à l'extérieur; ceci arrive quand le niveau du liquide est le même à l'intérieur et à l'extérieur du cylindre.

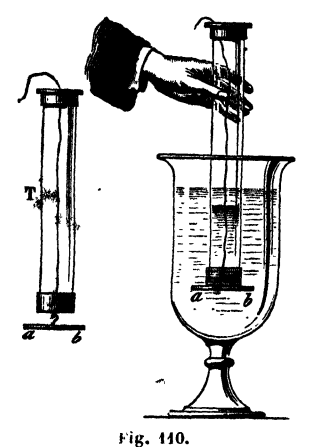


Fig. 110.

La pression exercée par le liquide est *indépendante de l'orientation de la paroi.* En effet, un obturateur qui ferme un tube de verre à base oblique, ne se détache que lorsque le liquide versé a le même niveau à l'intérieur et à l'extérieur.

On peut faire usage d'une *capsule manométrique;* c'est un petit tambour plat T, dont l'une des bases est une plaque de métal, tandis que l'autre est fermée par une membrane *c* de caoutchouc tendue. A la paroi latérale de la capsule est adapté un tube *b,* relié par un tuyau de caoutchouc à l'une des branches M d'un tube en U qui contient de l'eau colorée. Ayant introduit la capsule dans un vase (fig. 111) et ayant versé un liquide dans le vase, on marque les niveaux dans le tube en U. Si l'on fait glisser la capsule horizontalement en poussant le tube *b,* la différence des niveaux *h* se maintient la même dans le tube en U. Cette différence *reste* invariable quand, en faisant tourner le tube *b* autour de son axe dans le bouchon qui le porte (fig. 111 *bis*), on donne

Fig. 111. Fig. 111 *bis*.

diverses orientations à la membrane pressée en laissant son centre immobile.

Différence des pressions sur deux éléments égaux à des niveaux différents. — La pression que supporte un élément ab d'un liquide pesant en équilibre à la profondeur h (fig. 112) dans un vase quelconque, est $sh\delta$, la pression que supporte un élément égal $a'b'$ dans le même vase à une profondeur h' est $sh'\delta$; la différence est $s\delta$ $(h' - h)$ ou le *poids d'une colonne cylindrique du liquide* qui a pour base *l'élément* et pour hauteur *la distance des deux plans horizontaux*, elle croît avec la profondeur.

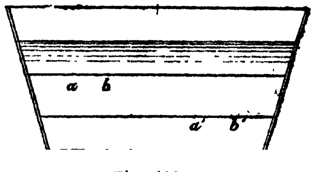


Fig. 112.

117. Pressions sur les parois des vases. — Un liquide pesant exerce des pressions sur les parois du vase qui le contient.

Pression sur le fond. — Supposons le fond plan et horizontal. Un élément supporte une pression égale au poids d'une colonne liquide qui a pour base la surface de l'élément, et pour hauteur sa distance à la surface libre. Il en est de même pour tous les éléments; *la somme des pressions est égale au poids* $Sh\delta$ *d'une colonne liquide ayant pour base la surface* S *du fond et pour hauteur la distance verticale h au niveau libre*, et cela, *quelle que soit la forme du vase*.

Il faut ajouter la pression Sp du milieu extérieur, sur une portion S de la surface libre égale à la surface du fond; p est cette pression par centimètre carré de la surface libre. La pression totale sur le fond sera $Sp + Sh\delta$.

Démonstration expérimentale (fig. 113). — Un support est garni d'un anneau dont le bord inférieur bien dressé peut être fermé par un obturateur de verre a suspendu au moyen d'un fil à l'un des bras d'une balance hydrostatique. La hauteur de la balance est

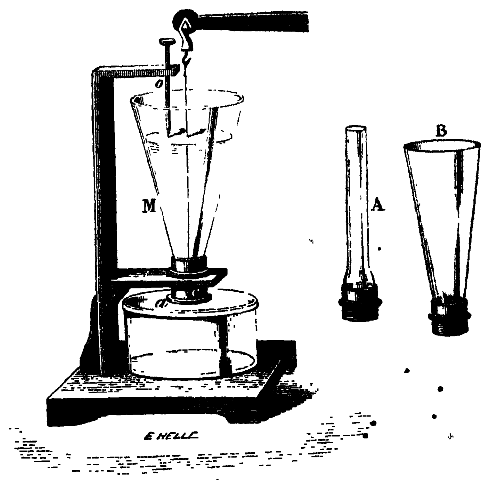


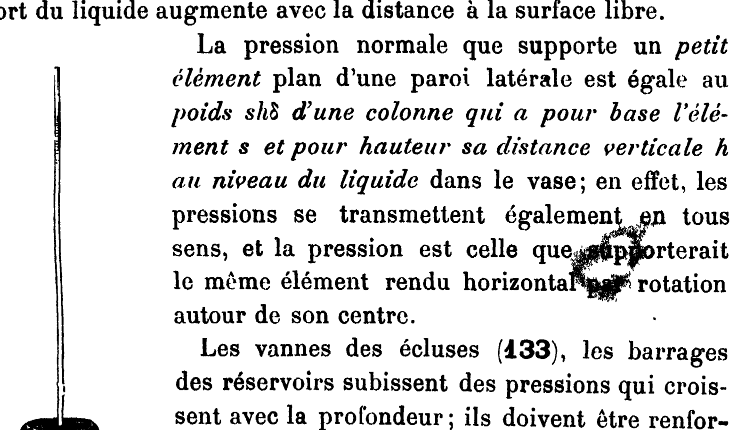
Fig. 113.

réglée pour que l'obturateur ferme exactement l'ouverture de l'anneau quand le fléau est horizontal. On met un poids à côté de la tare de l'obturateur et on visse sur l'anneau des vases de formes diverses, M, A, B, qui ont tous l'obturateur pour fond. En versant lentement de l'eau dans le vase, le fond mobile se détache toujours quand le liquide a atteint *une même hauteur h*, qu'on marque par une pointe latérale *o*.

La pression exercée sur le fond est la pression qui détache l'obturateur; elle ne varie pas avec la forme du vase, elle ne dépend que de la surface du fond et de sa distance au niveau libre. Cette pression équivaut au *poids d'une colonne cylindrique* qui a pour base le fond et pour hauteur la hauteur commune *h*.

Pressions latérales. — Les parois latérales éprouvent aussi des pressions par transmission.

La pression est prouvée par le *jaillissement* qui se produit quand on pratique une ouverture dans une paroi latérale d'un vase plein d'eau; comme, à la sortie, la direction du jet est *normale*, la pression est *normale à la paroi*. Le jet s'infléchit ensuite sous l'action de la pesanteur. Si l'on ferme l'orifice par une membrane en caoutchouc mince, on voit la membrane se bomber vers l'extérieur et l'effort du liquide augmente avec la distance à la surface libre.



La pression normale que supporte un *petit élément* plan d'une paroi latérale est égale au *poids* $sh\delta$ *d'une colonne qui a pour base l'élément s et pour hauteur sa distance verticale h au niveau du liquide* dans le vase; en effet, les pressions se transmettent également en tous sens, et la pression est celle que supporterait le même élément rendu horizontal par rotation autour de son centre.

Les vannes des écluses (**133**), les barrages des réservoirs subissent des pressions qui croissent avec la profondeur; ils doivent être renforcés à leur base pour ne pas céder à la pression de l'eau.

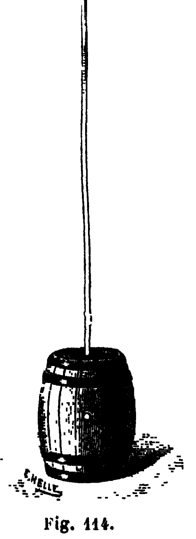


Fig. 114.

La pression peut être très grande même avec une petite quantité de liquide. L'expérience du *tonneau de Pascal* en est un exemple. Un tonneau dressé sur une de ses bases, est surmonté d'un long tube perpendiculaire à la base supérieure. Le tonneau

et le tube sont remplis d'eau. Si le tube est assez long, la forte pression exercée sur les parois latérales peut les disjoindre (fig. 114).

Sur une *portion étendue* d'une paroi plane, la pression totale est la somme des poids de filets liquides qui ont pour bases les éléments de la surface et pour hauteurs les distances verticales de chacun de ces éléments au niveau. On démontre que *cette somme*, c'est-à-dire la pression sur une portion plane quelconque de la paroi latérale est *égale au poids d'un prisme liquide qui a pour base la surface considérée et pour hauteur la distance verticale comprise entre le niveau et le centre de gravité de la surface* (1). Le point d'application de la pression du liquide est appelé **centre de pression**, il est *plus bas que le centre de gravité* (2).

118. Résultante des pressions exercées sur les parois d'un vase. — Il ne faut pas confondre la pression exercée sur le fond d'un vase et la pression sur le support qui soutient le vase. Des vases de même fond, mais de formes diverses, remplis jusqu'à la même hauteur, exercent sur le fond horizontal la même pression; mais ils n'ont pas le même poids, car les composantes verticales des pressions latérales s'ajoutent aux pressions supportées par le fond ou s'en retranchent suivant leur sens, ce qui fait que *l'effort exercé par un des vases sur le plateau d'une balance est égal au poids du liquide qu'il renferme, accru du poids du vase.*

On sait bien, en effet, que si l'on verse un litre d'eau dans des vases de formes différentes, l'augmentation de poids est pour tous un kilogramme.

Supposons trois vases différents, A, B, C de même base et dans lesquels un liquide s'élève à la même hauteur.

A

Fig. 115.

Dans le vase *cylindrique* A (fig. 115), sur chaque élément de paroi latérale, la pression est normale à la paroi et par conséquent horizontale, elle n'a pas d'action sur une balance; dans ce cas, la pression sur le fond et le poids du liquide ont la même valeur.

(1) C'est visible pour une surface plane ayant un centre de figure; on peut en effet la décomposer en éléments superficiels qu'on considérera par groupes de deux éléments, égaux, symétriquement placés par rapport au centre et pour lesquels les pressions sont $\sigma(h + h') = \sigma H$; H est la distance du centre de figure à la surface libre, h et h' sont les côtés parallèles d'un trapèze.

(2) En effet, le centre de gravité est le point d'application de la résultante des poids des éléments eux-mêmes, forces parallèles réparties uniformément sur la surface; le centre de pression est le point d'application de forces parallèles qui croissent avec la profondeur. Pour obtenir le centre de pression, on peut supposer ces forces dirigées parallèlement aux poids, puisque la position du point d'application de la résultante ne dépend pas de la direction des forces. Ce point d'application, plus rapproché des plus grandes forces, est plus bas que le centre de gravité.

Dans le vase C (fig. 116), *évasé à sa partie supérieure,* la pres-

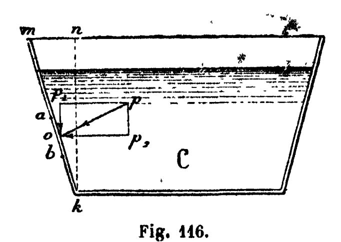


Fig. 116.

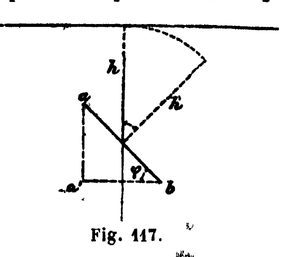


Fig. 117.

sion *op* sur un élément latéral *ab* de surface σ est normale à la paroi, égale à $\sigma h\delta$; elle peut être décomposée en une composante horizontale op_2 et une composante verticale op_1 ; op_2 n'a pas d'action sur la balance; la composante verticale op_1 (fig. 117) a pour valeur $\sigma h\delta \cos \varphi$, ou $\sigma' h\delta$; $\sigma' = \sigma \cos \varphi$ étant la projection $a'b$ de l'élément *ab* sur la surface du niveau libre, $\sigma' h\delta$ est le poids d'un filet liquide vertical de base $a'b$, compris entre le niveau libre et le point considéré de la paroi. Les composantes verticales op_1 agissent de haut en bas, leur somme est égale au poids du liquide contenu dans l'espace triangulaire *mnk*.

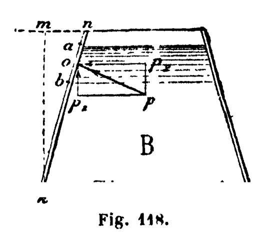


Fig. 118.

Pour le vase B (fig. 118), *rétréci à sa partie supérieure,* les composantes verticales soulèvent le vase, et leur résultante est égale au poids du liquide que contiendrait l'espace triangulaire *mnk*.

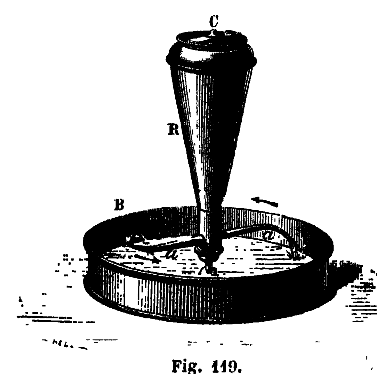
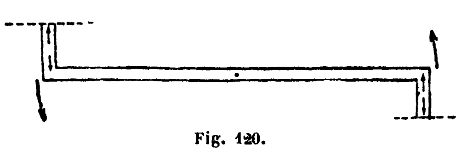


Fig. 119.

Recul dû à l'écoulement. — Les composantes horizontales des pressions exercées sur les parois latérales d'un vase sont sans influence sur le plateau d'une balance. D'autre part, elles se détruisent, car elles sont égales et opposées; en effet un *chariot* contenant un liquide, porté sur des roulettes fort mobiles et placé sur un plan poli, reste en repos. Si l'on pratique latéralement un orifice, le liquide jaillit et la pression qui s'exerçait sur la paroi est supprimée. La pression diamétralement opposée subsiste et pousse l'équipage en sens inverse de l'écoulement.

On prouve encore l'existence des composantes horizontales par le *tourniquet hydraulique*. C'est un vase conique R portant à sa partie inférieure deux tubulures *a* en prolongement, dont les extrémités, recourbées horizontalement en sens contraire, sont librement ouvertes. Le vase est rempli d'eau et mobile autour d'un axe vertical C (fig. 119). L'eau s'écoule à la fois par les deux ouvertures et l'appareil tourne en *sens inverse* de l'écoulement. En effet, les portions de tube opposées aux ouvertures subissent des pressions horizontales qui sont contrebalancées quand les ouvertures des tubes sont bouchées (fig. 120); quand les ouvertures sont découvertes, ces pressions produisent le mouvement.


Fig. 120.

PRESSIONS SUR LES CORPS IMMERGÉS

119. PRINCIPE D'ARCHIMÈDE. — Un liquide pesant agit sur un corps qui y est plongé comme sur les parois d'un vase. Les pressions partielles ont une résultante verticale appelée **poussée**, dirigée de bas en haut, *égale au poids du liquide déplacé par le corps*.

Démonstration. — Ce résultat s'explique : 1° Soit un prisme rectangle vertical plongé dans un liquide (fig. 121), S sa section droite, H sa hauteur. La pression du liquide sur la base inférieure du prisme est verticale, dirigée de bas en haut et égale à $Sh\delta$, h distance de la base inférieure au niveau libre du liquide; la pression sur la base supérieure est verticale, dirigée de haut en bas et égale à $Sh'\delta$, h' distance de la base supérieure au niveau libre. La différence des deux pressions est verticale, dirigée de bas en haut, égale à $S(h - h')\delta$, ou $SH\delta$: *poids du liquide déplacé* par le prisme.

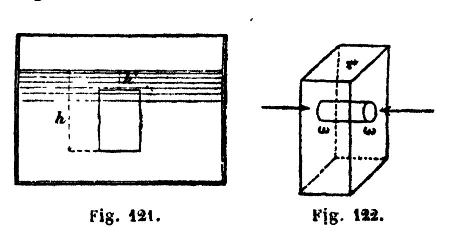


Fig. 121. Fig. 122.

Les *pressions latérales n'ont pas d'effet*, car sur deux éléments ω égaux (fig. 122), situés au même niveau et sur des faces en regard, les pressions sont horizontales, égales et directement opposées.

2° Soit un faisceau de prismes accolés, à arêtes verticales (fig. 123). Chacun éprouve sur ses faces supérieure et inférieure des pressions dont la différence est une poussée verticale égale au poids du liquide déplacé. La poussée totale, somme des poussées verticales exercées sur chacun des

prismes, est égale au poids du liquide déplacé. Les poussées horizontales se détruisent : nous pouvons en effet considérer chacun des prismes comme subissant l'action du liquide sur tout son pourtour; cela revient à introduire deux pressions égales et contraires sur chacun des éléments ω d'une face de contact de deux prismes, cachée à l'action du liquide; l'une f' est attribuée au premier prisme, l'autre f est attribuée au deuxième.

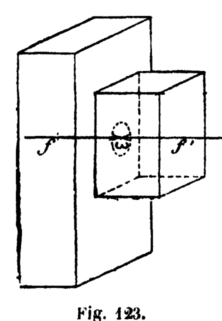


Fig. 123.

Un corps quelconque est décomposable en un faisceau de prismes verticaux de section très petite.

Démonstration expérimentale (fig. 124). — A l'un des plateaux d'une *balance hydrostatique* (**101**), on suspend un cylindre de laiton creux C et au dessous un cylindre massif D dont le volume est égal au volume intérieur du cylindre creux et qui peut le remplir exactement [1]. Le système

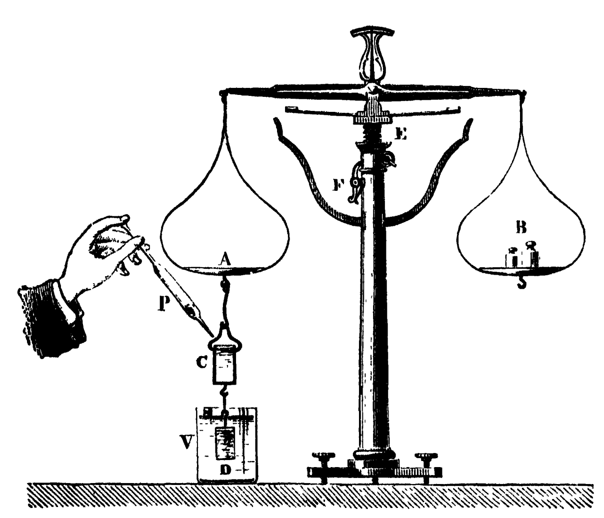


Fig. 124.

étant équilibré avec une tare B, on fait descendre le fléau de la balance et on plonge le cylindre massif dans un vase plein d'eau; le cylindre plongé éprouve une poussée et le fléau s'incline du côté de la tare [2]. L'équilibre est rétabli et le fléau redevient horizontal

(1) Quand on a emboîté le cylindre massif dans le cylindre creux et qu'on vient ensuite à le tirer brusquement, on entend un bruit causé par la rentrée de l'air dans le vide que l'adhérence complète des deux cylindres avait produit.

(2) Il y a diminution apparente de poids, sans diminution de la masse.

si on remplit d'eau le cylindre creux. La poussée est donc égale au poids de l'eau qui remplit le cylindre creux ou de l'eau que déplace le cylindre massif [1].

Pour opérer avec un corps A de *forme quelconque*, on place sur un des plateaux de la balance un vase vide *v'* et on suspend le corps A au même plateau. On établit l'équilibre avec une tare. On fait plonger le corps A dans un récipient contenant de l'eau jusqu'à un repère *r* (fig. 125). L'équilibre est rompu, le niveau monte en *r'*, le liquide compris de *r* en

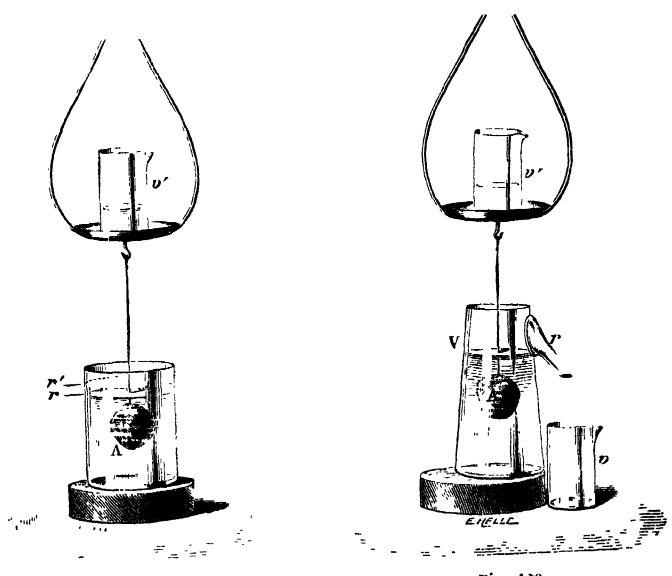


Fig. 125. Fig. 126.

r' a le volume du liquide déplacé. On rétablit l'équilibre en versant dans le vase vide *v'* l'eau comprise entre les deux repères *r* et *r'*.

Il vaut mieux faire usage d'un récipient V muni d'une tubulure recourbée *r* formant un *trop plein;* le récipient est d'abord exactement rempli d'eau jusqu'à la tubulure. Si l'on fait plonger le corps A dans le récipient, la balance penche du côté de la tare, ce qui démontre l'existence d'une poussée verticale. Le liquide déplacé s'est écoulé, on le recueille en *v;* l'équilibre est rétabli quand ce liquide est versé en *v'* (fig. 126). Si les deux vases *v* et *v'* ont le même poids, on remplace le vase vide *v'* par le vase *v* dans lequel le liquide s'est écoulé.

(1) L'expérience se fait *commodément* en renversant l'ordre des opérations. Ayant suspendu au plateau de la balance le cylindre creux et au dessous le cylindre massif et établi l'équilibre au moyen d'une tare, on remplit d'eau le cylindre creux, l'équilibre est rompu; on le rétablit en plongeant complètement dans l'eau le cylindre plein.

Réaction exercée sur le liquide par le corps plongé. — Un corps plongé subit de la part de l'eau une poussée, de bas en haut, mais il exerce aussi sur l'eau une réaction égale, de haut en bas (*Égalité de l'action et de la réaction*).

Sur un des plateaux d'une balance (fig. 127) on place un vase à trop plein V rempli d'eau jusqu'à la tubulure recourbée et venant déboucher au-dessus d'un vase vide *v*; on équilibre le tout par une tare *t*. Dans le vase V on plonge un corps quelconque soutenu par

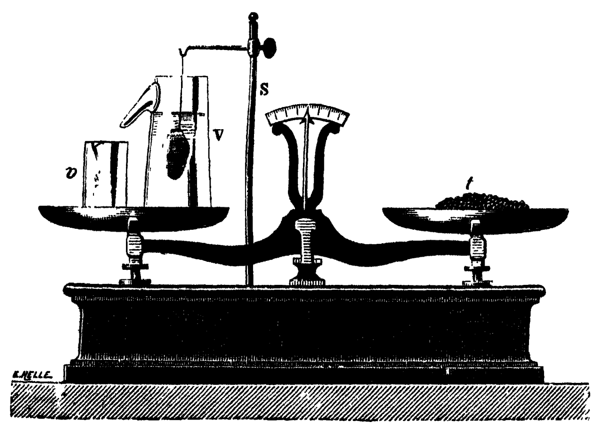


Fig. 127.

un support S *indépendant* de la balance; le niveau monte et le liquide déplacé par le corps s'écoule dans le vase *v*. Le plateau de la balance s'incline, accusant une poussée exercée par le corps sur l'eau. On rétablit l'équilibre en enlevant l'eau du vase *v*. La poussée *de haut en bas* exercée sur l'eau par le corps est donc égale au poids du liquide déplacé (1).

120. Corps immergés et corps flottants. — Un corps immergé est sollicité par deux forces verticales : 1° son poids P, appliqué de haut en bas à son centre de gravité; 2° la poussée ϖ, égale au poids du liquide déplacé, appliquée de bas en haut au **centre de poussée** (centre de gravité du liquide déplacé) (2).

---

(1) Lorsque le corps n'est pas soutenu d'une façon indépendante, mais plongé librement *dans le liquide d'un vase qui est placé sur le plateau d'une* balance, il éprouve une poussée de bas en haut de la part du liquide, mais il réagit sur le liquide par une poussée de sens contraire; ces deux efforts égaux se détruisent, et l'équilibre établi avant l'immersion dans le liquide subsiste.

(2) Nous avons décomposé un corps plongé en prismes verticaux de section infiniment petite subissant la pression du liquide sur toute leur surface. Ces prismes peuvent

La force qui fait tomber le corps dans le liquide est la différence P — ϖ. Cette différence entre le poids absolu du corps et la poussée est son **poids apparent**.

P $>$ ϖ : le corps est plus lourd que le liquide (cuivre dans l'eau), il tombe, mais sa chute est moins rapide que dans l'air, car la force qui le fait descendre est inférieure à son poids dans l'air.

P $<$ ϖ : le corps est plus léger que le liquide (liège dans l'eau, fer dans le mercure), la poussée l'emporte sur son poids, il remonte vers la surface. Quand il sort en partie de l'eau, la poussée diminue; il arrive un moment où elle *devient égale au poids, qui reste invariable*. Dès lors, le corps cesse de monter, il flotte, *son poids est égal au poids du liquide déplacé*. Un corps de poids spécifique supérieur à celui du liquide ne peut flotter que s'il est creux.

P $=$ ϖ : le corps reste immergé sans monter ni descendre.

On réalise ces trois cas en plongeant un œuf dans l'eau; il tombe au fond d'une eau pure, car sa densité moyenne surpasse celle de l'eau; dans une eau saturée de sel marin, il flotte; dans un mélange

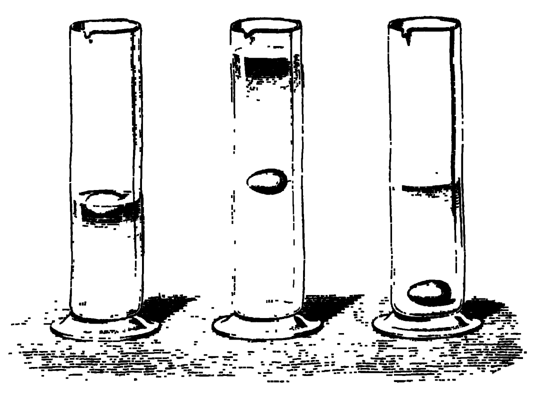


Fig. 129.

être partagés à leur tour en prismes de petite hauteur par des plans horizontaux très rapprochés. Ces petits prismes peuvent être considérés comme subissant la pression du liquide sur toute leur surface, car on n'introduit ainsi sur chacune des nouvelles surfaces horizontales de séparation *ab* que deux pressions égales et contraires (fig. 128). Les éléments de volume subissant tous une poussée, ces poussées partielles, égales respectivement au poids de l'élément déplacé, ont pour résultante le poids total du liquide déplacé ; le point d'application de cette résultante sera le centre de gravité du liquide déplacé, car la décomposition en éléments qu'on ferait du liquide, pour trouver son centre de gravité, est celle qui est faite ici pour trouver le centre de poussée.

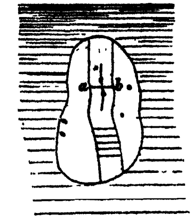


Fig. 128.

convenable d'eau pure et d'eau salée, il reste où on le place (fig. 129).

Équilibre des corps flottants. — Pour qu'un corps flottant soit en équilibre : 1° *le centre de gravité du corps et le centre de poussée doivent être sur une même verticale;* 2° *le poids du liquide déplacé doit être égal au poids total du corps flottant.*

1° Si le centre de gravité G et le centre de poussée O ne se trouvent pas *sur une même verticale,* les deux forces égales appliquées en G et en O forment un couple qui dirige le corps jusqu'à ce que les deux points soient ramenés sur une même verticale (fig. 130). L'équilibre est certainement *stable* quand le centre de gravité est plus bas

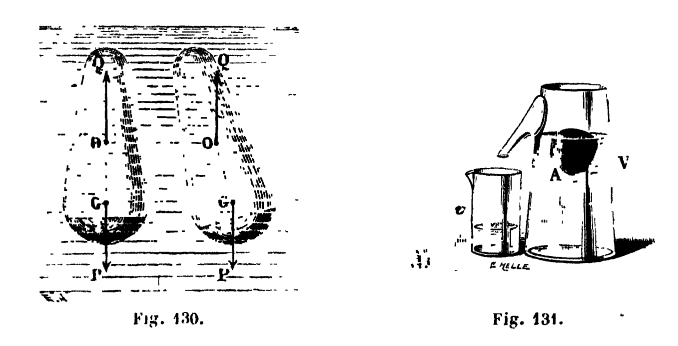


Fig. 130. Fig. 131.

que le centre de poussée. On abaisse le centre de gravité en lestant le corps plongé avec un corps lourd.

2° Le poids d'un corps flottant, ou en équilibre à l'intérieur d'un liquide, est égal au poids du liquide déplacé; on le constate avec un vase V rempli d'eau jusqu'à un trop plein. Si l'on pose sur le liquide un corps A moins dense que l'eau, le corps flotte et déplace du liquide. Le poids du liquide écoulé en *v* est égal au poids du corps A (fig. 131). C'est ainsi qu'un bateau s'enfonce jusqu'à ce qu'il déplace un poids d'eau égal à son propre poids; il s'enfonce plus dans l'eau douce que dans l'eau salée.

Les *bateaux sous-marins* présentent une application des conditions d'équilibre des corps flottants. Leur coque étant hermétiquement fermée, on les fait plonger en introduisant de l'eau à l'aide d'une pompe dans des réservoirs étanches de la cale. Le bateau, complètement immergé, reste en équilibre quand son poids est exactement égal au poids de l'eau qu'il déplace. On le fait mouvoir horizontalement à l'aide d'organes propulseurs spéciaux. Pour interrompre la navigation sous-marine, on vide l'eau des réservoirs et le bateau remonte pour flotter comme un bateau ordinaire. Pendant la plongée,

le capitaine commande la manœuvre de direction d'après les indications d'un *périscope;* d'autre part, l'atmosphère respirée par les hommes de l'équipage est empruntée à un réservoir à air comprimé.

DÉTERMINATION DES DENSITÉS

121. Les poids de volumes égaux de différentes substances : cuivre, verre, liège,... sont souvent très différents. On caractérise exactement ces différences en mesurant le poids spécifique d'un corps ou le poids de son unité de volume.

Le poids spécifique étant égal au produit de la densité ou masse spécifique, par l'accélération de la pesanteur, la comparaison des poids spécifiques, en un même lieu, revient à la comparaison des densités.

La densité d'une substance à t^0 *est la masse d'un centimètre cube de cette substance à* t^0.

On obtient la densité d'un corps à t^0 en prenant le rapport de la *masse* en grammes du corps à son *volume* en centimètres cubes à t^0. Le volume d'un corps est généralement difficile à évaluer par des mesures géométriques, mais ce volume est exprimé par le même nombre que la masse d'un volume d'eau (eau à 4^0) égal au volume du corps; la densité d'un corps est donc le rapport des masses de volumes égaux du corps à t^0 et d'eau à 4^0 (1).

Pour déterminer la densité d'un corps à t^0, on mesure par la méthode des doubles pesées : 1° la masse du corps ou son poids en grammes; 2° la masse ou le poids en grammes d'un volume d'eau à 4^0 égal au volume du corps à t^0 (2). Le quotient est la densité à t^0.

MÉTHODE DU FLACON

122. Corps liquides. — *Appareil.* — Le flacon est un réservoir cylindrique en verre A surmonté d'un tube capillaire et d'un

(1) Le rapport des masses de volumes égaux d'un corps A et d'un corps B est appelé *densité relative* de A par rapport à B; ce rapport est indépendant des unités de masse et de volume; si le corps B de comparaison est l'eau, la densité absolue est, avec les unités adoptées, exprimée par le même nombre que la densité relative.

(2) Aux températures ordinaires, c'est-à-dire voisines de 15°, le poids d'un volume d'eau à 4° diffère extrêmement peu du poids d'un égal volume d'eau à t^o; aussi, *pratiquement,* la densité d'un corps à t^o est égale au rapport du poids d'un certain volume du corps à t^o au poids d'un égal volume d'eau à t^o

entonnoir B fermé par un bouchon (fig. 132). Un repère O est tracé sur le tube capillaire. On détermine successivement les masses de liquide et d'eau contenues dans le flacon à 0^0 jusqu'au trait.

Expérience. — Le flacon plein de liquide est amené à 0^0 dans la glace fondante; quand le niveau du liquide ne varie plus, on enlève avec du papier buvard l'excès de liquide au-dessus du trait. Le flacon retiré de la glace, revenu à la température ambiante et essuyé, est porté sur le plateau d'une balance; on établit l'équilibre avec une tare placée dans l'autre plateau. Puis on vide le flacon, on le dessèche intérieurement et on le reporte vide sur son plateau; l'équilibre avec la tare est rétabli par M grammes de la boîte de poids; M est, par double pesée, le poids en grammes *du liquide* contenu dans le flacon à 0^0 jusqu'au repère.

Fig. 132.

En répétant ces opérations avec de l'eau distillée, on obtient le poids en grammes M'' de l'eau contenue dans le flacon à 0^0. On opère à 0^0 parce qu'il est aisé de maintenir un corps à 0^0 au moyen de la glace fondante.

Calcul. — M étant la masse du liquide à 0^0, M' la masse d'un égal volume d'eau à 4^0, la densité du liquide à 0^0 est $D_0 = \frac{M}{M'}$; nous n'avons pas mesuré M', mais la masse M'' d'un égal volume d'eau à 0^0. Or $e_0 = \frac{M''}{M'}$, e_0 étant la densité de l'eau à 0^0, égale à 0,9998 (**216**), en définitive :

$$D_0 = \frac{M}{M'} = \frac{M}{M''} e_0 \text{ (1)}.$$

On aurait la densité à t^0 en déterminant les masses de liquide et d'eau M_1 et M''_1 contenues à t^0 jusqu'au trait dans le flacon plongé dans un bain à t^0; $D_t = \frac{M_1}{M''_1} e_t$ (e_t, densité de l'eau à t^0).

123. Corps solides. — *Appareil.* — Le flacon A est fermé par un bouchon creux B terminé par un tube capillaire et un entonnoir b. Un trait de repère O est marqué sur le tube capillaire (fig. 133).

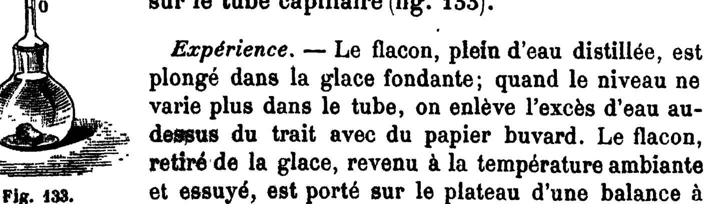


Fig. 133.

Expérience. — Le flacon, plein d'eau distillée, est plongé dans la glace fondante; quand le niveau ne varie plus dans le tube, on enlève l'excès d'eau au-dessus du trait avec du papier buvard. Le flacon, retiré de la glace, revenu à la température ambiante et essuyé, est porté sur le plateau d'une balance à

(1) Aux températures ordinaires, M' et M'' diffèrent extrêmement peu.

côté d'un fragment du solide dont on veut déterminer la densité. On fait la tare du flacon et du corps, on enlève ensuite le corps et on le remplace par M grammes, M est la masse du corps.

Les poids marqués et le flacon étant enlevés, on introduit le corps dans le flacon en expulsant les bulles d'air adhérentes. Le flacon est placé dans la glace fondante; quand le niveau ne varie plus, on enlève l'excès d'eau qui dépasse le repère. Le flacon, revenu à la température ambiante et essuyé, est reporté sur le plateau de la balance; comme il est sorti du flacon un volume d'eau égal au volume du corps à 0^0, M'' grammes sont nécessaires pour rétablir l'équilibre primitif, ils représentent la masse d'un égal volume d'eau à 0^0.

Calcul. — M' étant la masse d'un volume d'eau à 4^0 égal au volume du corps à 0^0, la densité du corps à 0^0 sera

$$D_0 = \frac{M}{M'} \text{ ou } \frac{M}{M''} e_0 \text{ (1)}.$$

124. Détermination du volume d'un vase. — Si la forme du vase n'est pas assez régulière pour que son volume puisse être calculé, on obtient ce volume en pesant l'eau qu'il renferme.

A cet effet, après avoir fait la tare du vase plein d'eau, on le vide, les M'' grammes qu'il faut placer à côté du vase vide pour faire équilibre à la tare donnent (en centimètres cubes) le volume de l'eau contenue ou le volume du vase.

S'il s'agit d'un vase de petites dimensions, tel que le réservoir d'un thermomètre, on détermine le poids en grammes du mercure qui le remplit, le quotient de ce poids par la densité du mercure donne la capacité cherchée.

Graduation d'un vase. — Sur le plateau d'une balance on place le vase vide, et à côté de lui un poids marqué, par exemple 500 grammes. Ayant fait la tare du tout, on enlève le poids de 500 grammes et on verse de l'eau dans le vase jusqu'à l'équilibre. On trace un repère horizontal au niveau de l'eau; du fond du vase au trait, le volume est de 500 centimètres cubes.

(1) Lorsque la substance solide est altérable par l'eau (sucre, poudre de guerre, etc.), le remplissage du flacon se fait avec un liquide de densité δ_0 dans lequel la substance n'est ni dissoute ni attaquée; ce liquide auxiliaire remplace l'eau à 0^0 des expériences précédentes. Soit M la masse du solide à 0^0, μ'' la masse d'un égal volume du liquide à 0^0, M' la masse d'un égal volume d'eau à 4^0, δ_0 la densité du liquide à 0^0,

$$D_0 = \frac{M}{M'} = \frac{M}{\mu''} \cdot \frac{\mu''}{M'} = \frac{M}{\mu''} \delta_0, \quad \text{car } \delta_0 = \frac{\mu''}{M'}$$

MÉTHODE DE LA BALANCE HYDROSTATIQUE

125. Corps solides. — *Expérience.* — Un fragment du corps solide est suspendu, par un fil fin de platine, sous l'un des plateaux d'une balance; on fait la tare dans l'autre plateau. On immerge ensuite complètement le corps dans l'eau distillée, et on détache avec soin les bulles d'air adhérentes. Les poids M″ placés du côté du corps pour rétablir l'équilibre (fig. 134) représentent, d'après le principe d'Archimède, la poussée subie par le corps ou le poids en grammes d'un volume d'eau égal au volume du corps.

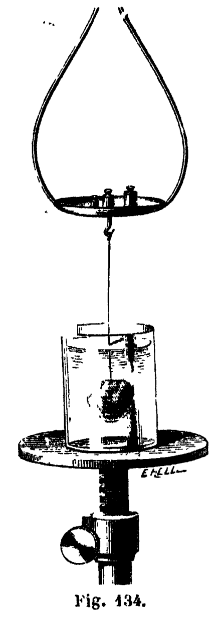


Fig. 134.

On enlève le corps en laissant le fil sous le plateau, le poids M qui rétablit l'équilibre est le poids du corps en grammes.

Calcul. — Si l'eau dans laquelle le corps a été plongé est à la température de t^0, la densité du corps à t^0 sera

$$D_t = \frac{M}{M''} e_t \quad \text{ou simplement} \quad \frac{M}{M''} \text{ (1)}$$

126. Corps liquides. — *Expérience.* — Au-dessous de l'un des plateaux d'une balance, on suspend par un fil de platine une boule de verre lestée avec du mercure et on fait la tare sur l'autre plateau. La boule est immergée complètement dans le liquide. Les M grammes qui rétablissent l'équilibre représentent la poussée ou le poids en grammes du liquide déplacé.

On obtient de la même façon le poids en grammes M″ de l'eau déplacée par la boule.

Calcul. — Si le liquide et l'eau ont été maintenus à t^0, M et M″ sont les masses de volumes égaux de liquide et d'eau à t^0,

$$D_t = \frac{M}{M''} e \quad \text{ou simplement} \quad \frac{M}{M''}.$$

127. Détermination du volume d'un solide. — On suspend le corps par un fil au plateau d'une balance et on fait la tare

(1) La méthode n'a pas assez de précision pour multiplier $\frac{M''}{M}$ par e_t.

sur l'autre plateau. Le corps est plongé dans l'eau distillée à t^0, il éprouve une poussée. On rétablit l'équilibre avec M grammes posés sur son plateau (fig. 134). Comme la densité de l'eau à t^0 est très voisine de l'unité, le volume V du corps en centimètres cubes est sensiblement le poids en grammes M de l'eau déplacée.

ARÉOMÈTRES

128. Les aréomètres sont des *flotteurs* formés d'un tube *cylindrique* en verre, lestés de façon à se maintenir verticalement dans les liquides. A cet effet, ils portent un renflement inférieur suivi d'une boule qui contient du mercure. Les aréomètres les plus employés *n'ont pas de repère fixe.* Le poids du liquide déplacé devant toujours être égal au poids total du flotteur, l'aréomètre s'enfonce d'autant moins que le liquide est plus dense.

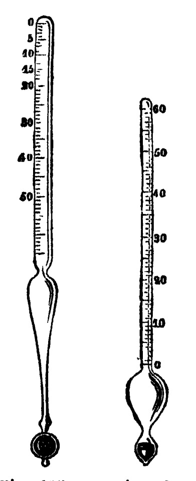


Fig. 135. Fig. 136.

Ces aréomètres *à poids constant et à volume variable* donnent sans pesée, par une lecture, la composition de certains liquides.

Le **pèse-acides** de Baumé, destiné aux liquides *plus denses que l'eau,* est lesté de façon à s'enfoncer dans l'eau pure à peu près jusqu'au *haut de la tige,* on marque 0 au point d'affleurement; plongé ensuite dans une solution de 85 parties d'eau en poids et 15 de sel marin, l'instrument s'y enfonce moins que dans l'eau. On marque 15 au nouveau point d'affleurement. L'intervalle de 0 à 15 est divisé en 15 parties égales, la graduation est prolongée au dessous. La tige est assez longue pour porter 70 divisions (fig. 135). L'instrument marque 66° dans l'acide sulfurique concentré.

Le **pèse-esprits** de Baumé, employé pour les liquides *moins denses que l'eau,* est lesté de façon à s'enfoncer jusqu'au *bas de la tige* dans une solution de 90 parties d'eau en poids et 10 de sel marin; on marque 0 au point d'affleurement. Dans l'eau pure, il s'enfonce davantage, on marque 10 au point d'affleurement. On divise l'intervalle en 10 parties égales, et on prolonge les divisions au dessus (fig. 136). L'instrument marque 36° dans l'éther du commerce (1).

Alcoomètre centésimal de Gay-Lussac. — Cet instrument fait

(1) Le pèse-acides et le pèse-esprits sont gradués à 12°5 (10° Réaumur).

connaître directement le volume d'*alcool pur* ou *absolu* que contiennent 100 volumes d'un mélange d'alcool et d'eau. Il est lesté de manière que dans l'eau distillée l'affleurement ait lieu au bas de la tige (fig. 137).

On verse dans des vases gradués 5, 10, 15... 95 volumes d'alcool pur ; dans tous, on complète le volume 100 avec de l'eau.

On plonge l'aréomètre successivement dans ces mélanges, on marque 0 au point d'affleurement dans l'eau, 5 dans la liqueur qui contient 5 centièmes de son volume d'alcool, 10 dans la liqueur suivante... 100 dans l'alcool absolu ; chaque intervalle est divisé en 5 parties égales. L'instrument s'enfonce dans un liquide alcoolique jusqu'à la division 46, si ce liquide renferme 46 *centièmes de son volume* d'alcool pur (46 litres d'alcool pur par hectolitre de liquide alcoolique) (1). Un thermomètre plonge dans le liquide en même temps que l'alcoomètre, car la graduation se fait à 15° et, pour une autre température, il faut une correction.

Fig. 137.

Les indications de l'instrument ne s'appliquent qu'à des mélanges qui contiennent seulement de l'alcool et de l'eau. Pour déterminer la richesse alcoolique d'un vin, on en distille un volume connu, puis à l'alcool distillé on ajoute de l'eau pure pour rétablir le volume primitif; on plonge l'alcoomètre dans ce mélange d'alcool et d'eau.

Les degrés d'un alcoomètre ne sont pas égaux. Les alcoomètres ont leurs divisions *proportionnelles ;* si leurs tiges sont bien calibrées, on détermine deux points quelconques de l'échelle par comparaison avec un alcoomètre étalon gradué directement et on trace graphiquement les autres points.

129. Volumètres. Densimètres. — Pour obtenir par une simple lecture la densité elle-même, on peut employer un aréomètre semblable à un aréomètre de Baumé, à tige bien cylindrique et gradué avec deux liquides de densités connues (fig. 138).

Pour les densités supérieures à celle de l'eau, l'instrument plongé dans l'eau distillée (densité 1) doit s'enfoncer à peu près jusqu'au *haut de la tige*; on y marque 100. Dans un liquide de densité $\frac{4}{3}$, par exemple, le volume déplacé sera V'. La masse totale M de l'instrument étant égale à la masse du liquide déplacé, on a l'égalité :

$$M = 100.1 = V' \cdot \frac{4}{3}.$$

(1) C'est ce qu'il importe de connaître au point de vue des impôts que prélève le fisc.

De là V' = 75. On marque 75 au point d'affleurement, et on divise l'intervalle de 100 à 75 en 25 parties égales; on prolonge la graduation. Pour un degré N la densité est donnée par 100 = Nx. Les volumes occupés par des masses M, égales, des différents liquides sont 100, 75, N. L'appareil ainsi gradué est appelé *volumètre*.

La graduation restant la même, les densités sont 1 à 100, $\frac{100}{75}$ ou $\frac{4}{3}$ à 75, $\frac{100}{N}$ à N. L'appareil prend le nom de *densimètre* si les densités sont marquées en face des points d'affleurement.

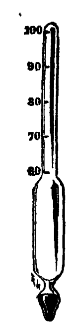


Fig. 138.

TABLE DES DENSITÉS

Aluminium	2,6	Verre (Crown)	2,6
Cuivre	8,8	Quartz	2,63
Fer	7,5	Eau à 4°	1
Platine	21,2	Alcool pur	0,79
Argent	10,5	Mercure	13,59
Zinc	7	Huile d'olive	0,92 (1)

130. Calcul des poids spécifiques. — Un poids spécifique s'exprime en dynes; il est égal au produit de la densité D du corps par l'intensité g de la pesanteur. La densité d'un corps est invariable, mais son poids spécifique varie, comme g, avec le lieu de l'observation. La densité de l'eau à 4° est partout égale à 1; son poids spécifique est 978 dynes à l'équateur et 981 dynes à Paris. De même, la densité du mercure à 0° est 13,59; son poids spécifique est 13,59.978 à l'équateur et 13,59.981 à Paris (2).

LIQUIDES SUPERPOSÉS

131. Si l'on verse dans un flacon plusieurs liquides de densités différentes, sans action chimique les uns sur les autres, ces liquides *se superposent par ordre de densité*, le plus lourd au fond (3) et les *surfaces de séparation sont horizontales*.

La poussée que subit une molécule au milieu d'un liquide moins dense est inférieure à son poids et elle tombe au fond.

La surface libre est horizontale, car la démonstration faite pour

(1) La densité de l'hydrogène est 0,0001.

(2) Le poids spécifique relatif d'un corps A par rapport à un corps B est le rapport des poids de volumes égaux de A et de B, il est le même en tout lieu. Si le corps de comparaison est l'eau, le poids spécifique relatif est le même nombre que la densité.

(3) La crème monte à la surface du lait, on fait brûler de l'huile à la surface de l'eau dans une veilleuse.

un liquide unique (**115**) est indépendante des portions liquides sous-jacentes. Les *surfaces de séparation sont horizontales;* car, s'il n'en était pas ainsi, deux surfaces égales prises sur un plan horizontal situé au-dessous d'une surface de séparation ne supporteraient pas la même pression.

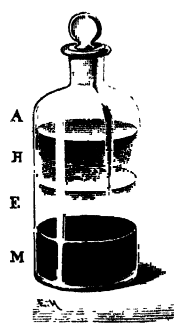


Fig. 139.

Fiole des quatre éléments. — On agite dans un flacon du mercure, de l'eau et de l'huile; les liquides se mélangent; par le repos ils se séparent de nouveau; le mercure va au fond, l'eau au-dessus, puis l'huile; l'air est le quatrième élément (fig. 139).

Niveau à bulle. — Un niveau à bulle d'air *sert à vérifier l'horizontalité d'une ligne droite* sur laquelle on le place. C'est un tube de verre fermé aux deux bouts et légèrement convexe. Il contient un liquide qui le remplit incomplètement et une bulle d'air. Le plan de séparation de l'air et du liquide est toujours horizontal. Le tube est logé dans une monture dont la *base*, rendue exactement parallèle à la surface libre du liquide, se trouve *horizontale* quand la bulle N est comprise *entre deux repères transversaux* de la partie convexe du tube (fig. 140).

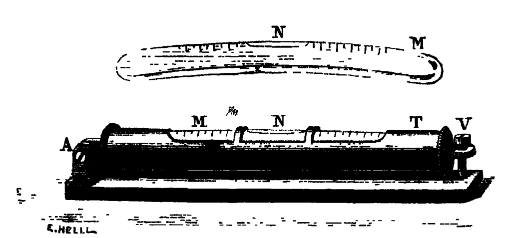


Fig. 140.

La base étant placée suivant une droite horizontale, la bulle s'arrête entre les deux repères; si la droite n'est pas horizontale, la surface libre du liquide, qui est toujours horizontale, n'est pas parallèle à la base et la bulle n'est plus alors comprise entre les repères.

Pour reconnaître dans les bâtis des machines, dans les charpentes, dans les appareils de précision, si un plan est horizontal, on place la base du niveau suivant deux droites du plan à peu près rectangulaires entre elles; si ces deux droites sont horizontales, le plan est horizontal, car il contient deux horizontales qui ne sont pas parallèles.

VASES COMMUNIQUANTS

132. ÉQUILIBRE D'UN LIQUIDE. — Quand un liquide est renfermé dans deux ou plusieurs vases de formes quelconques qui com-

muniquent entre eux, l'ensemble ne forme qu'un *vase unique;* par suite, les *surfaces libres, horizontales* dans chaque vase, sont *dans un même plan horizontal.*

Vérification. — On prend un large vase V sur la paroi latérale duquel est mastiqué un conduit métallique horizontal, muni d'un robinet R et d'une tubulure dans laquelle on ajuste successivement des tubes en verre 1, 2, 3 de formes diverses (fig. 141). Le vase V ayant été rempli d'eau, le liquide monte dans le tube et les surfaces libres s'établissent sur un même plan horizontal.

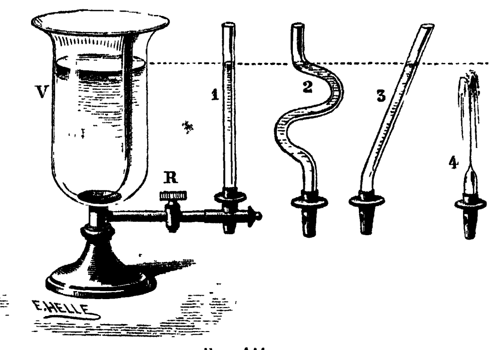


Fig. 141.

La même vérification se fait plus simplement avec deux vases quelconques réunis à leur partie inférieure par un tube en caoutchouc. Un liquide qu'on y a versé prend le même niveau dans les deux vases, quelle que soit la position relative qu'on leur donne.

133. Applications. — Les mers et les océans occupent d'immenses vases communiquants; pour cette raison, leur niveau est le même (à peu près sphérique). Ce niveau est pris pour point de départ des altitudes à la surface du globe. Le niveau des mers intérieures peut être différent de celui des océans.

L'explication des jets d'eau et des puits artésiens se déduit de la théorie des vases communiquants, il en est de même de la distribution de l'eau dans les villes, du jeu des écluses dans un canal.

Jets d'eau. — Si dans la tubulure du vase V (fig. 141), on ajuste un tube 4, trop court pour que le liquide puisse, à l'ouverture du robinet R, s'y élever au même niveau qu'en V, le liquide sort en gerbe verticale. Le frottement de l'air et le choc des gouttes qui retombent diminuent la hauteur à laquelle s'élève le liquide.

On installe un jet d'eau, en faisant arriver au centre d'un bassin un tuyau qui communique avec un réservoir *élevé,* plein d'eau; l'eau jaillit et retombe dans le bassin.

Puits artésiens. — Imaginons une couche sableuse perméable, intercalée entre deux couches imperméables; supposons de plus les trois couches courbées et la couche perméable affleurant à des ni-

veaux élevés (fig. 142). Si vers le milieu de la cuvette ainsi formée, on perce un puits en traversant la couche imperméable supérieure, on rencontre une nappe d'eau d'infiltration retenue dans le sable. Les niveaux du liquide tendent à former un plan horizontal comme dans des vases communiquants et le niveau général s'établit dans le

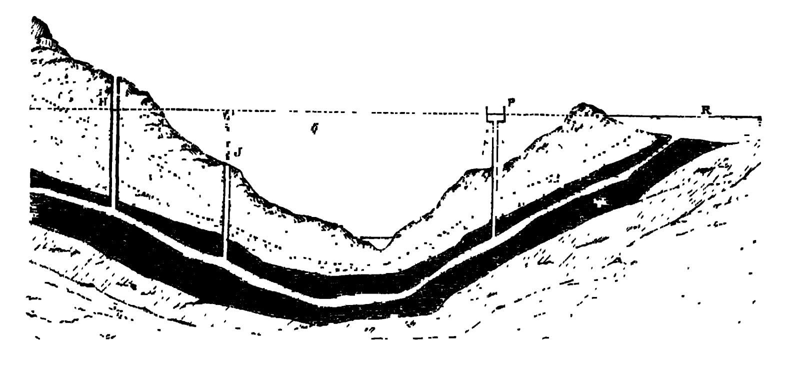


Fig. 142.

tube du puits. L'eau du puits de Grenelle à Paris, provenait ainsi d'une couche de sable comprise entre deux couches imperméables d'argile, et imbibée par la pluie qui tombe sur ses surfaces d'affleurement en Champagne et en Normandie.

Distribution de l'eau dans les villes. — L'eau d'alimentation d'une ville est accumulée dans un grand réservoir central très élevé. De ce réservoir partent de gros tuyaux dont les ramifications, munies de robinets, aboutissent aux fontaines et aux étages des maisons. Quand on ouvre un robinet, l'eau qui s'échappe tend à s'élever au niveau du réservoir. La vitesse d'écoulement croît avec la différence de niveau entre le robinet et le réservoir.

Écluses. — Les canaux sont composés de parties successives ou *biefs,* dans chacune desquelles le niveau est horizontal. Le niveau varie brusquement d'un bief au suivant. Une *écluse* est une portion de canal courte et étroite, intercalée entre deux biefs, séparée du supérieur par une porte A et de l'inférieur par une porte B.

Pour faire passer un bateau du bief supérieur au bief inférieur, on ouvre A, l'écluse se remplit d'eau au niveau supérieur et reçoit le bateau; on ferme A et on fait écouler l'eau de l'écluse par une vanne pratiquée en B; le bateau descend au niveau inférieur et passe quand on ouvre B. La manœuvre du passage inverse se conçoit.

Nivellements. — C'est en utilisant l'égalité de niveau dans

deux vases communiquants que l'on effectue un nivellement ou la détermination de la *distance verticale de deux points*.

Dans les ateliers, on emploie deux *éprouvettes* contenant de l'eau (fig. 143), divisées en centimètres et portant un même numéro à la même distance du fond ; les éprouvettes sont munies chacune d'une tubulure et réunies par un long tuyau de caoutchouc. On les pose aux deux points A et B dont on cherche la distance verticale. Les niveaux dans les éprouvettes s'établissent dans un même plan horizontal et la différence des lectures donne la différence des niveaux.

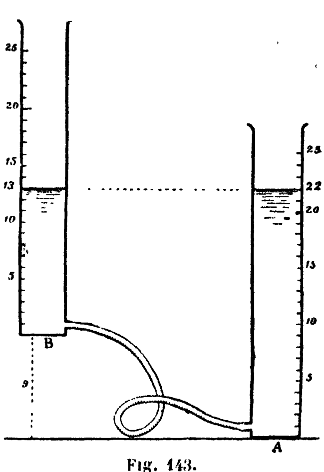


Fig. 143.

Niveau d'eau. — Le niveau d'eau est un tube métallique dont les deux extrémités sont coudées et terminées par deux fioles en verre A et A′ (fig. 144). Le tube est maintenu en son milieu par un trépied S.

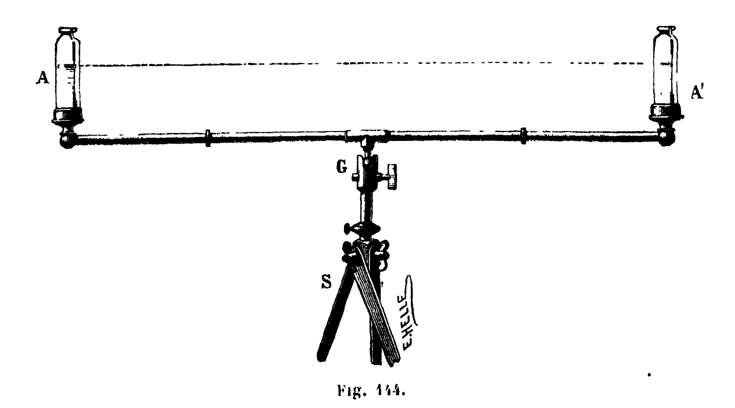


Fig. 144.

Le plan horizontal, qui passe par les surfaces libres d'une eau colorée versée dans les deux fioles, sert de plan de comparaison.

Pour mesurer la distance verticale du sol, de deux points A et B, on fait fixer en A une règle divisée verticale le long de laquelle glisse une *mire* (fig. 145), on met l'œil près du niveau *n′* et on dirige le rayon visuel suivant la ligne *nn′* des deux niveaux; *le rayon visuel est alors horizontal.* Un aide déplace lentement la mire jusqu'à ce qu'on le prévienne que le rayon visuel rencontre le centre de la mire.

La distance de ce centre au point A est lue sur la règle. L'aide trans-

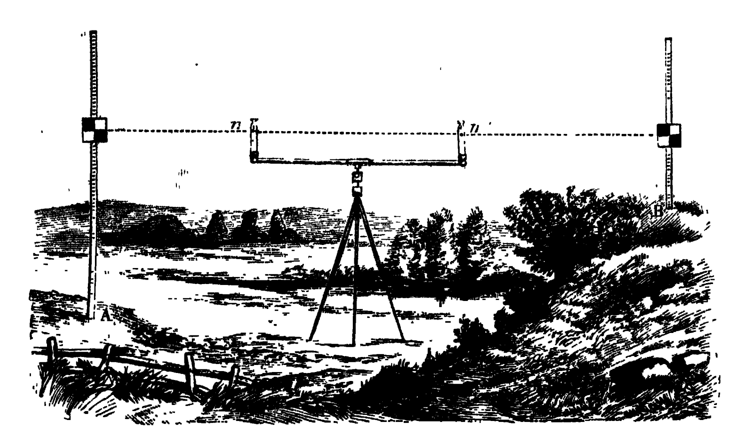


Fig. 145.

porte la règle en B, on place l'œil en *n* et on s'aligne sur *n'*; le centre de la mire est amené sur le rayon visuel et sa distance au point B est lue sur la règle. La mesure cherchée est la *différence* des hauteurs lues, sur la règle, dans les deux cas.

134. ÉQUILIBRE DE DEUX LIQUIDES. — Si deux vases communiquants renferment deux liquides *non miscibles,* le liquide le plus lourd remplit le tube de communication et les *hauteurs des surfaces libres des deux liquides au-dessus du plan horizontal de leur surface de séparation sont en raison inverse des densités.*

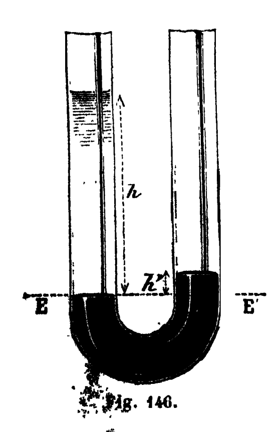


Fig. 146.

Versons d'abord du mercure, puis dans la branche la plus longue, de l'eau au-dessus du mercure. La *surface de séparation en* E *est horizontale* (fig. 146); nous l'avons démontré (**131**).

La colonne qui remplit le tube, au-dessous du plan horizontal EE' mené par la surface de séparation, est en équilibre, et resterait en équilibre si les colonnes qui surmontent E et E' étaient supprimées. Les pressions sur deux surfaces égales en E et E' sont égales, car la pression exercée en E' par le mercure et transmise de bas en haut en E, fait équilibre à la pression qui s'exerce directement sur E par l'eau.

Soient h et h' les hauteurs des deux liquides au-dessus de leur plan de séparation EE', D et D' leurs densités, la pression exercée par le mercure sur une surface s en E' est $sh'D'g$, la pression exercée par l'eau sur une surface s en E est $shDg$; ces deux pressions sont égales. Donc $hD = h'D'$.

Nous avons supposé des pressions égales sur les surfaces libres.

L'équilibre de deux liquides différents dans deux vases communiquants permet de trouver le rapport de leurs densités (**214**).

ACTIONS MOLÉCULAIRES

Certaines actions des corps sont attribuées à un agent spécial, chaleur, électricité, magnétisme; d'autres résultent de contacts, on les nomme spécialement actions moléculaires. Les phénomènes d'adhérence et de capillarité appartiennent à cette classe.

ADHÉRENCE

Les particules voisines de deux corps exercent entre elles des forces attractives qui peuvent établir une telle continuité entre les surfaces en contact qu'il faut un effort pour les séparer.

135. Adhérence entre solides. — Si l'on prend deux disques de verre parfaitement plans et usés à l'émeri fin et si on les fait glisser l'un sur l'autre avec pression de façon à chasser l'air interposé, les deux disques s'unissent. Le système étant suspendu à un anneau, il faut appliquer un poids P à la lame inférieure pour produire la séparation (fig. 147). Les deux verres ne se détachent pas dans le vide, car leur adhérence ne provient pas de la pression atmosphérique.

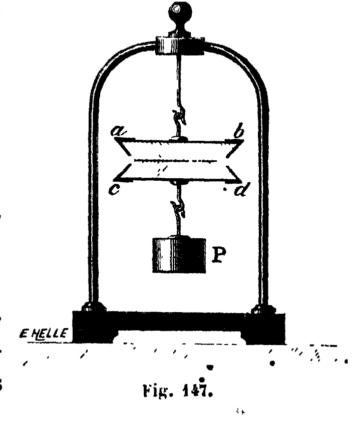


Fig. 147.

Dans les manufactures de glaces, on interpose des cales entre les glaces que l'on empile afin d'éviter une adhérence qui ne permettrait plus de les séparer sans rupture.

Après avoir fait dans une balle de plomb une section bien plane avec un rasoir, si l'on rapproche aussitôt les surfaces brillantes des

deux moitiés en les pressant l'une contre l'autre, avant qu'elles aient eu le temps de s'oxyder, elles adhèrent fortement.

En passant au laminoir une feuille d'or et une feuille d'argent superposées et bien appliquées, les surfaces de la double lame qu'on obtient sont aussi bien réunies que si on les avait soudées.

Certaines limailles métalliques soumises à une forte pression fournissent un lingot métallique aussi compact que par fusion.

Filtration. — Les phénomènes de *filtration* présentent un autre exemple d'attraction moléculaire entre solides.

Un **filtre** est une substance poreuse offrant dans sa masse une infinité de très petits interstices irréguliers. Si l'une des faces de la couche filtrante, mise en contact avec un liquide qui l'imbibe, est soumise à une pression, cette pression détermine par l'autre face une transsudation qui débarrasse le liquide des particules solides en suspension. *Le débit d'un filtre est proportionnel à la différence des pressions sur les deux faces* de la couche filtrante.

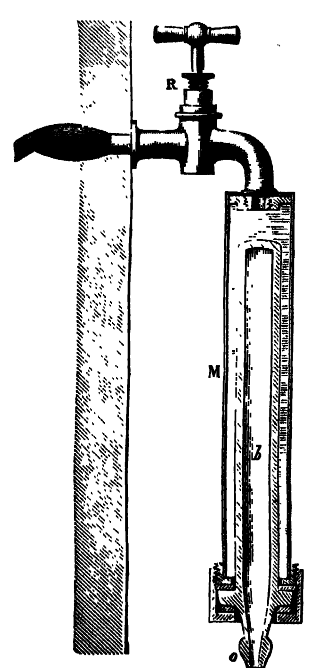


Fig. 148.

On emploie comme substances filtrantes le papier non collé, différents tissus, la peau de chamois, le sable, le charbon, les pierres poreuses et en particulier la *porcelaine non émaillée.*

Un filtre n'est pas un crible, car ses pores ont des dimensions supérieures à celles de certains des corpuscules qu'il arrête. Bien que le diamètre des pores des filtres Chamberland (1) (fig. 148) ne descende pas au-dessous de 30 microns, ces filtres retiennent *par adhérence* des micro-organismes qui n'ont pas un micron de diamètre.

De même, la filtration de l'air à travers de l'ouate légèrement tassée, arrête des poussières et des germes en suspension dont les dimensions sont plus petites que les interstices traversés.

---

(1) Le filtre Chamberland est une *bougie* creuse, en porcelaine non émaillée, placée dans un tube métallique M qui communique avec la conduite par un robinet à vis R. Amenée sous pression à l'extérieur de la bougie, l'eau filtre à l'intérieur en *b* à travers les parois de la porcelaine, s'écoule par l'orifice *o*; elle est recueillie dans un réservoir.

Teinture. — La teinture est une opération qui *modifie la teinte* des peaux, de la laine, de la soie et des fibres textiles. Elle est produite *par une adhérence mécanique* de matière colorante. Ainsi du linge plongé dans de l'eau qui tient en suspension du bleu d'outremer insoluble, prend une nuance azurée due à des particules de bleu retenues par les fibres. La matière colorante logée dans les pores des fibres peut ne pas s'en séparer par des lavages.

Habituellement, les phénomènes physiques qui interviennent dans la teinture, sont compliqués de phénomènes chimiques.

Ainsi, dans certains cas, où les fibres ne fixent que peu la matière colorante, on leur fait absorber préalablement un intermédiaire appelé *mordant,* qui est souvent un oxyde métallique, tel que l'alumine. Le mordant se combine à la matière colorante en produisant un composé insoluble que les fibres retiennent.

136. Adhérence entre solide et gaz. — On sait que des *solides poreux*, comme le charbon de bois, absorbent une grande quantité de certains gaz et les gardent emprisonnés. De même le chlorure d'argent absorbe l'ammoniaque (**281**).

De la mousse de platine se charge d'une masse d'hydrogène telle que le dégagement de chaleur dû à la diminution de volume du gaz absorbé fait rougir le platine. A froid, par un vide prolongé, l'hydrogène ne peut être extrait.

Beaucoup de solides, plongés dans un gaz, se recouvrent d'une gaine gazeuse qui ne disparaît qu'en faisant le vide plusieurs fois sur le solide chauffé.

137. Adhérence entre solide et liquide. — Un disque de verre, soutenu par le plateau d'une balance et équilibré, adhère à une surface d'eau sur laquelle on le pose, et il faut placer des poids dans l'autre plateau pour le détacher. Quand on soulève le disque, il emporte une couche de liquide qui s'est fixée à sa surface.

Si l'on plonge une tige de verre dans un liquide qui la mouille, par exemple dans l'eau et qu'on la retire ensuite, une goutte liquide reste suspendue à l'extrémité inférieure de la tige. Le liquide qui touche immédiatement le verre adhère au solide, mais le reste est suspendu par la *viscosité* ou la cohésion du liquide sur lui-même.

CAPILLARITÉ

138. Les phénomènes d'adhérence entre solides et liquides conduisent à des exceptions aux lois de l'hydrostatique.

En hydrostatique, on observe qu'un liquide présente les caractères suivants : 1° il n'a pas de forme déterminée; 2° sa surface libre est horizontale; 3° il se met de niveau sur un même plan horizontal dans plusieurs vases communiquants.

Ces lois supposent que les particules liquides ne sont pas soumises à d'autres forces que la pesanteur; elles se montrent parfois en défaut : 1° sur une surface plane polie, une goutte de mercure prend une forme qui est d'autant plus voisine de la forme sphérique que la goutte est plus petite; 2° la surface d'un liquide n'est pas horizontale au voisinage du bord d'un vase; 3° dans un tube de verre fin ou *capillaire*, le niveau du liquide est différent du niveau extérieur et la surface terminale du liquide dans le tube n'est pas plane.

Ces exceptions ont reçu des explications qui se déduisent des mêmes principes et forment le groupe des phénomènes capillaires.

139. Ascensions et dépressions capillaires. — Les apparences changent suivant que le liquide *mouille* ou ne mouille pas le solide. Un liquide mouille un solide (eau et verre) quand son adhérence surpasse sa propre cohésion. Le liquide ne mouille pas si sa cohésion surpasse son adhérence au solide (eau et verre graissé; mercure et verre).

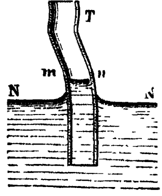


Fig. 149.

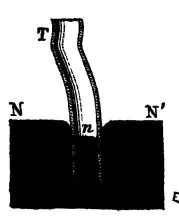


Fig. 150.

Dans un vase large, la surface reste plane et horizontale au milieu du vase; mais il n'en est plus de même dans un tube très étroit. La surface libre du liquide prend une forme concave (dite *ménisque concave*) si le liquide mouille le tube et le liquide intérieur est *soulevé* au-dessus du niveau extérieur, en *mn* (fig. 149). Si le liquide ne mouille pas le tube, sa surface libre est convexe (*ménisque convexe*) et le niveau intérieur est *déprimé* en *n* (fig. 150). La différence de niveau est la même dans le vide, ce qui exclut l'influence de la pression de l'air.

Loi des hauteurs. — *La différence de niveau varie en raison inverse du diamètre du tube,* ce diamètre étant mesuré au point où se forme le ménisque.

Quand le tube est mouillé par le liquide, la différence de niveau *ne dépend ni de l'épaisseur ni de la nature du tube;* elle dépend de la nature du liquide. Dans un tube de verre bien propre de 1^{mm} de diamètre et à 8°, l'eau s'élève de 30^{mm}, l'alcool de 12,

l'éther de 10. L'ascension *diminue quand la température s'élève.*

Direction de l'action capillaire. — La production d'un ménisque dans un tube donne lieu à une force verticale, inversement proportionnelle au diamètre du tube et agissant sur le liquide *de la convexité vers la concavité.* La force est soulevante pour un ménisque concave, déprimante pour un ménisque convexe. Une réaction contraire s'exerce du liquide sur le solide, tend à enfoncer le tube si le ménisque est concave et à le soulever si le ménisque est convexe (1).

Dépressions barométriques. — Une dépression capillaire ayant lieu quand on mesure la pression atmosphérique dans un baromètre étroit, une correction doit être *ajoutée* à la hauteur observée, elle est négligeable avec des tubes de plus de 3 centimètres de diamètre.

140. Tension superficielle. — Le fait expérimental d'une tension superficielle explique les phénomènes capillaires.

La couche superficielle de tout liquide se comporte comme une membrane élastique et contractile, tendue sur le liquide.

Expériences démontrant l'existence d'une tension superficielle. — On forme une *bulle de savon* B à l'extrémité d'un tube T avec un *mélange visqueux de glycérine et d'eau de savon.* Lorsque la bulle est devenue suffisamment grosse, on cesse de souffler dans le tube. Si l'on ferme alors l'extrémité du tube, la bulle conserve une grosseur invariable et son enveloppe liquide comprime le gaz intérieur, à la façon d'un ballon de caoutchouc gonflé d'air. Quand on laisse le tube ouvert, la bulle revient progressivement sur elle-même en chassant l'air qu'elle contient; la flamme d'une bougie s'incline devant l'ouverture du tube, par le courant d'air (fig. 151). Un manomètre mis en communication avec le tube accuse un excès de pression du gaz intérieur.

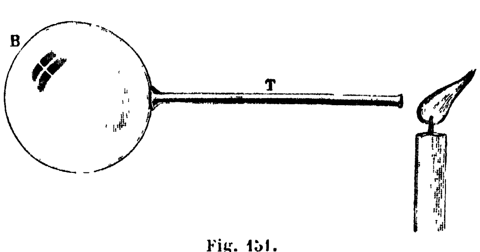


Fig. 151.

On démontre la tension superficielle *à la surface d'un liquide* avec une

(1) Les ascensions et dépressions capillaires expliquent de nombreux phénomènes journaliers. Quand un morceau de sucre est en contact avec de l'eau, le liquide monte dans les petits tubes que forment les pores du sucre. L'eau mouille jusqu'au sommet un tas de sable dont elle baigne la base. Le suif fondu s'élève entre les fils de la mèche d'une bougie et l'huile monte dans la mèche d'une lampe. L'ascension de la sève dans les végétaux s'explique de même. Certains insectes marchent sur l'eau en la déprimant parce que leurs pattes sont couvertes d'un enduit gras qui les empêche d'être mouillées. Ils s'enfoncent si l'on dissout avec de l'éther l'enduit qui couvre leurs pattes. De même, une aiguille légèrement grasse flotte sur l'eau.

étroite cuvette en papier non glacé, de un centimètre environ de hauteur. Après avoir mouillé les bords intérieurs, on y verse doucement de l'eau. La contractilité de la couche superficielle incurve en dedans les parois de la cuvette.

Mesure de la tension superficielle. — Imaginons une membrane mince de caoutchouc, uniformément tendue sur toute sa surface; si, avec un canif, on fait dans cette membrane une incision rectiligne, normalement à la surface, sur une longueur d'un centimètre, les deux bords de la coupure s'écartent l'un de l'autre (fig. 152). L'effort que l'un des bords exerçait sur l'autre aa' est la somme des petites forces parallèles qu'il faudrait appliquer le long de ce bord perpendiculairement à sa direction pour s'opposer à son écartement. Sur une longueur de 1 centimetre, cette somme mesure la tension superficielle A du liquide. On l'évalue en dynes.

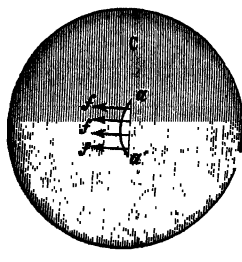


Fig. 152.

Explication par la tension superficielle des ascensions et dépressions capillaires. — La surface libre du liquide, à l'intérieur d'un tube étroit T, est assimilable à une membrane élastique tendue bab', de forme hémisphérique, soutenue par une gaine très mince attachée aux parois du tube liquide (fig. 153). Les tensions qui tirent le liquide vers le haut s'exercent parallèlement à l'axe du tube le long de la circonférence bb' du plan de base de l'hémisphère.

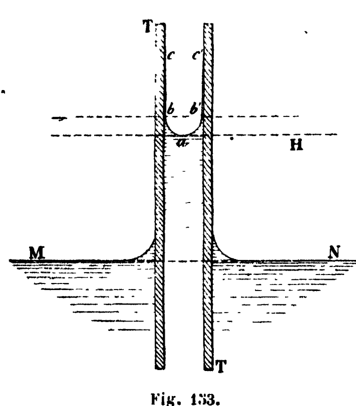


Fig. 153.

En désignant par A la *tension superficielle par centimètre,* la somme des tensions sur le pourtour d'une circonférence de rayon r est $2\pi r A$; elle fait équilibre au poids $\pi r^2 h \delta g$ d'un cylindre liquide de base bb' soulevé au-dessus du niveau libre extérieur MN; la hauteur h du cylindre est la hauteur moyenne du liquide soulevé; appelons δ la densité du liquide. De l'égalité $\pi r^2 h \delta g = 2\pi r A$, on déduit

$$h = \frac{2A}{r\delta g}$$ (1)

Pour un même liquide, les *hauteurs* moyennes *des colonnes soulevées varient donc en raison inverse des rayons des tubes.*

La membrane superficielle déprime un liquide qu'elle ne mouille pas.

Calcul par la tension superficielle du poids d'une goutte liquide. — L'emploi d'un tube capillaire, cylindrique et court, ou *compte-gouttes,* pour mesurer une masse de liquide par un nombre de gouttes, repose

(1) Pour l'eau, $\delta g = 981$. Si l'on a évalué h et r en centimètres, le calcul de A pour l'eau donne 75 dynes par centimètre.

sur ce fait que les gouttes d'un même liquide qui tombent ont toutes *la même masse* (1). Le plan de l'orifice est sensiblement perpendiculaire à l'axe vertical du tube. Le liquide qui adhère au contour de l'orifice limite un globule qui forme la goutte. En s'accroissant, la goutte s'étrangle, et pour une certaine pression, elle se détache quand elle a atteint un poids constant. La surface de la goutte agit comme une membrane élastique qui entoure la goutte, elle s'ouvre au moment où la goutte se détache; le poids P de la goutte surpasse alors infiniment peu la somme des tensions le long de la circonférence de la base de la goutte à l'orifice d'écoulement. Pour un rayon r de l'orifice, on a : $P = 2\pi r A$; A varie avec le liquide.

Influence de la capillarité sur la poussée d'un corps flottant. — Les tensions superficielles qui s'exercent sur le pourtour de la ligne de raccordement d'un corps flottant et du liquide s'ajoutent au poids du corps pour l'enfoncer si le liquide le mouille, elles s'en retranchent si le liquide ne le mouille pas.

Soit r le rayon de la tige d'un *aréomètre* plongé dans un liquide qui le mouille, et A la tension superficielle du liquide : la somme des tensions superficielles sur le pourtour de la tige est $2\pi r A$. Ces tensions enfoncent la tige d'une hauteur h, jusqu'à ce qu'elles soient équilibrées par un accroissement de poussée $\pi r^2 h d g$.

Ces effets se produisent avec un aréomètre plongé dans différents liquides. Soient v et v' les volumes occupés par l'aréomètre dans des liquides de densités d et d', P le poids total de l'instrument :

$$vdg = P + 2\pi r A \quad \text{et} \quad v'd'g = P + 2\pi r A'$$

On n'a $vd = v'd'$ que si $A = A'$ (2).

OSMOSE

Lorsque deux liquides superposés sont *miscibles* ou peuvent se mélanger, le liquide inférieur pénètre lentement, par *diffusion*, dans le liquide supérieur. Si, au moyen d'une pipette, on fait passer une dissolution de sulfate de cuivre au fond d'un vase renfermant de l'eau, bien que la solution saline soit plus lourde que l'eau, le changement de couleur indique qu'elle s'élève progressivement.

141. Osmose. — Quand deux liquides miscibles sont séparés par une membrane que les deux liquides mouillent ou au moins l'un des deux, ils se diffusent à travers la membrane. Prenons un tube de verre T fermé à son extrémité inférieure par une membrane m, tel

(1) En Pharmacie, on adopte un compte-gouttes dont le tube d'écoulement a un diamètre extérieur déterminé (3 millimètres); les gouttes ont alors un poids connu pour un même liquide. L'eau distillée donne 20 gouttes par gramme.

(2) Les effets de capillarité n'influent pas sur les indications des alcoomètres, puisqu'ils sont toujours plongés dans les liquides mêmes qui ont servi à les graduer.

qu'un fragment de vessie, et versons dans le tube de l'eau sucrée. Si l'on plonge le tube ainsi préparé dans un vase V renfermant de l'eau pure (fig. 154), de manière que l'eau sucrée et l'eau se trouvent au même niveau, le liquide monte lentement dans le tube T. Il passe de l'eau sucrée dans l'eau extérieure (**exosmose**) et de l'eau pure du vase V dans l'osmomètre T (**endosmose**). La vitesse d'endosmose de l'eau est supérieure à la vitesse d'exosmose de l'eau sucrée.

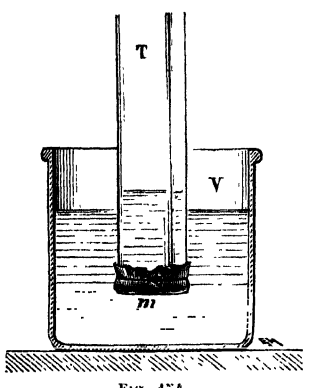


Fig. 154.

En renouvelant l'eau du vase extérieur, on finit par faire sortir tout le sucre du tube T. Le niveau du liquide intérieur s'abaisse à mesure que la concentration de l'eau sucrée s'affaiblit; l'égalité de niveau s'établit quand les deux liquides ont la même composition. C'est le principe de la **dialyse**, *méthode de séparation analytique*.

Dialyse. -- Les corps qui traversent le plus vite une membrane sont les substances cristallisables ou **cristalloïdes**. Les substances analogues à la colle ou **colloïdes** (albumine, gélatine, caramel, etc.) passent très lentement. Dans un vase en verre *v* (fig. 155) dont le fond *p* est en *papier parcheminé* (1), on verse un mélange d'un cristalloïde et d'un colloïde (par exemple bichromate de potasse dissous dans l'eau et caramel) et on dispose sous le premier vase un second vase V rempli d'eau pure. Le cristalloïde traverse le papier parcheminé et se rend dans l'eau du vase inférieur, tandis que le colloïde reste dans le vase supérieur qui est dit le **dialyseur**. En renouvelant l'eau du vase V, on se débarrasse peu à peu du cristalloïde (2).

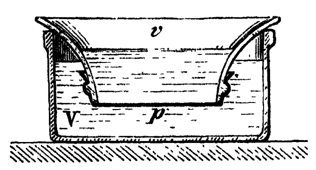


Fig. 155.

Au lieu d'une ascension, un osmomètre peut présenter une *dépression*. Cela dépend de la nature des membranes et des liquides. Ainsi, il y a dépression pour un osmomètre à membrane de caoutchouc renfermant de l'alcool et plongé dans l'eau.

---

(1) Le papier parcheminé s'obtient par l'action sur le papier d'un mélange en proportions convenables d'acide nitrique et d'acide sulfurique.

(2) La dialyse est avantageuse pour débarrasser des corps cristalloïdes de colloïdes qui gênent les actions chimiques. Ainsi l'acide arsénieux, la strychnine se séparent par dialyse de l'albumine et de la gomme auxquelles ils peuvent être mélangés.

Dans les organismes vivants, où l'on rencontre des liquides miscibles, séparés par des membranes qu'ils mouillent, l'osmose intervient comme mécanisme d'incorporation et d'élimination.

Pression osmotique. — Certaines membranes ne permettent le transport que *dans une seule direction*, on les dit **hémiperméables**. C'est le cas de cloisons artificielles, telles qu'un précipité de ferrocyanure de cuivre obtenu en séparant par de la faïence poreuse (vase de pile) deux solutions, à 3 %, l'une de sulfate de cuivre, l'autre de ferrocyanure de potassium. Les deux solutions cheminent en sens inverse, et en se rencontrant à l'intérieur de la paroi poreuse, y forment par précipitation un dépôt continu de ferro-cyanure de cuivre.

Si l'on remplit un vase hémiperméable *c* d'une solution aqueuse de sucre (fig. 156) et si, après l'avoir fermé et relié à un manomètre M, on le plonge dans l'eau pure, celle-ci y pénètre et la pression augmente dans l'intérieur du vase jusqu'à une valeur maximum dite *pression osmotique* de la dissolution. *Il n'y a pas passage de sucre dans l'eau extérieure*(1).

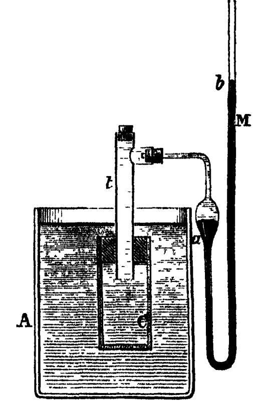


Fig. 156.

La pression osmotique, variable avec la solution, est indépendante de la nature et de l'épaisseur de la cloison hémiperméable; l'influence de la cloison ne s'exerce que sur le temps nécessaire pour atteindre à la pression osmotique.

Les solutions de même pression osmotique sont dites *isotoniques*.

STATIQUE DES GAZ

142. Un gaz est un fluide *expansible, compressible* et *élastique*.

Expansibilité. — L'expansibilité des gaz a été montrée (**54**) en plaçant sous une cloche une vessie fermée à l'aide d'un robinet et ne contenant qu'un peu de gaz. Si l'on raréfie l'air de la cloche, la vessie se gonfle de plus en plus à mesure que le vide se fait.

Par son expansibilité, un gaz remplit tout entier le vase qui le renferme au lieu d'occuper seulement le fond comme le fait un liquide. *Un gaz n'a donc pas de surface libre.*

Compressibilité et élasticité. — Les gaz sont *beaucoup plus compressibles que les liquides* et éprouvent une forte diminution de volume sous l'action de faibles forces.

(1) Une membrane hémiperméable ne l'est que pour un certain nombre de substances ; la pellicule de ferrocyanure de cuivre l'est pour le saccharose, la dextrine, la gomme.

Les gaz sont *parfaitement élastiques ;* ils reprennent en effet exactement leur volume primitif quand la compression cesse; nous l'avons vu avec le ***briquet à air*** (fig. 38).

143. Transmission des pressions par les gaz. — Comme les liquides, en raison de la mobilité de leurs molécules, *les gaz transmettent en tous sens les pressions qu'on leur fait subir.*

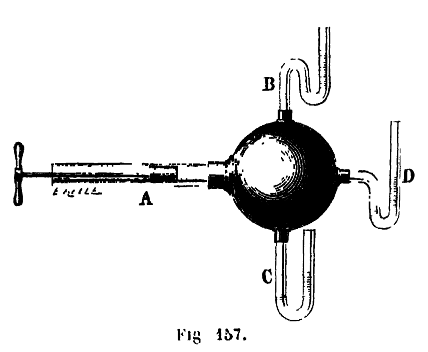
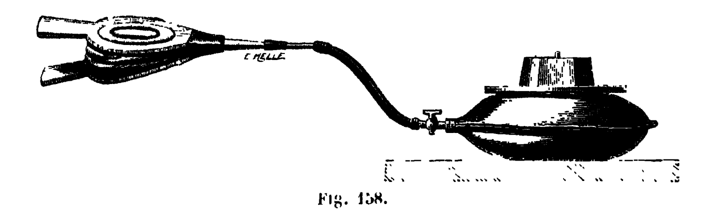


Fig 157.

Imaginons un récipient (fig. 157) muni en A d'un corps de pompe où glisse un piston et en B, C, D de tubulures portant des tubes recourbés qui contiennent un liquide de même niveau dans les deux branches. En enfonçant le piston, la pression se transmet en tous sens et fait monter également le liquide des tubes.

On réalise une expérience analogue à celle de la presse hydrau-


Fig. 158.

lique en réunissant un sac de caoutchouc à un soufflet par un tube (fig. 158). Sur le sac sont posés une planche et un poids. Une petite pression exercée sur la section du tube en injectant de l'air par le soufflet gonfle le sac et soulève un fort poids en se transmettant sur la large surface de contact de la planche et du sac. Avec une surface pressée égale à 500 fois la section du tube, un effort de 10 grammes soulève 5 kilos.

PESANTEUR ET PRESSION DES GAZ

144. Pesanteur des gaz. — Bien qu'on ne les voie pas tomber comme les solides et les liquides, *l'air et les gaz sont pesants.*

Pour le démontrer, on suspend au-dessous de l'un des plateaux d'une balance un ballon de quelques litres, plein de gaz à la pression ordinaire et fermé par un robinet. On fait la tare.

On fait le vide dans le ballon, le fléau s'incline du côté de la tare. Pour rétablir l'équilibre, on ajoute du côté du ballon (fig. 159) *m* grammes qui remplacent le gaz sorti (13 grammes environ pour 10 litres d'air). La densité d'un gaz est beaucoup plus faible que celle d'un liquide.

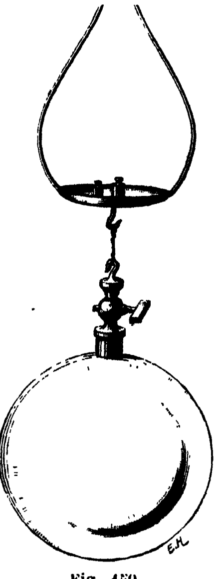


Fig. 159.

Pressions exercées par un gaz pesant. — Une colonne gazeuse presse par son poids sur une couche placée au-dessous d'elle, et celle-ci transmet cette pression aux couches inférieures en l'accroissant de son poids.

Comme dans un liquide, *dans un gaz en équilibre, tous les points d'un même plan horizontal supportent la même pression.*

Dans un récipient, la différence des pressions à deux niveaux différents A et B est égale au poids d'un cylindre ayant pour hauteur la *distance verticale des deux niveaux*. Pour un liquide, qui est peu compressible, l'augmentation de pression n'accroît que d'une façon insensible la masse contenue dans l'unité de volume au niveau inférieur et la densité varie très peu de A en B. Pour un gaz, qui est très compressible, l'accroissement de densité peut être notable.

Toutefois, dans un récipient de faible hauteur, le poids par unité de surface de quelques décimètres de gaz est négligeable par rapport à la force élastique et celle-ci est considérée comme constante en tous les points de la masse.

PRESSION ATMOSPHÉRIQUE

145. L'atmosphère est une couche d'air (1), retenue par attraction, qui enveloppe le globe terrestre ; elle le suit dans son mouvement de translation sur son orbite et dans son mouvement de rotation autour de la ligne des pôles. Cette couche n'est pas homogène ; le poids des couches supérieures comprime en effet les couches inférieures et la densité croît à mesure qu'on se rapproche du sol. La

(1) L'atmosphère terrestre est un mélange. Pour 100 litres, il y a sensiblement 21 litres d'oxygène, 78 litres d'azote, 1 litre d'argon, de très petites quantités d'autres gaz (crypton, néon, xénon, hélium), de vapeur d'eau, d'acide carbonique. L'air tient en outre en suspension d'innombrables poussières, minérales et organiques.

surface du globe supporte une *pression* égale au poids de la colonne d'air qui forme l'atmosphère. Cette pression ne peut être calculée puisque l'on ne connaît ni la hauteur de l'atmosphère, ni la loi exacte du décroissement de la densité quand on s'élève. Elle est donnée directement par l'expérience du baromètre, due à Torricelli.

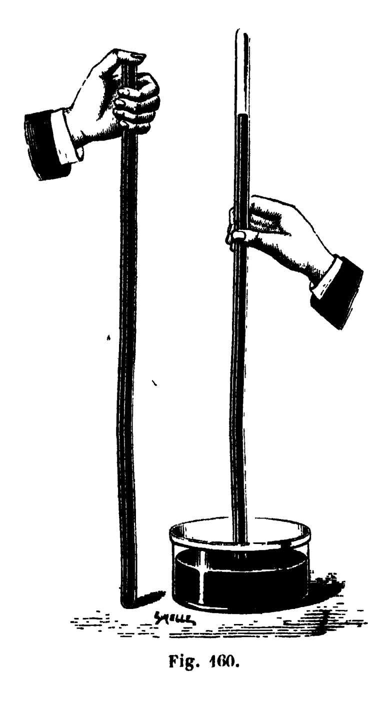


Fig. 160.

Expérience du baromètre. — On prend un tube de verre, de 7 à 8 millimètres de diamètre intérieur et de 85 centimètres environ de longueur, fermé par un bout; on le remplit de mercure et, après avoir bouché l'extrémité ouverte avec le pouce, en ayant soin de n'emprisonner aucune bulle d'air, on le renverse dans une cuvette pleine de mercure. Si le pouce est alors retiré, le mercure descend dans le tube et se fixe à environ 76 centimètres au-dessus du niveau dans la cuvette, laissant au-dessus de lui un espace vide, dit **chambre barométrique** (fig. 160).

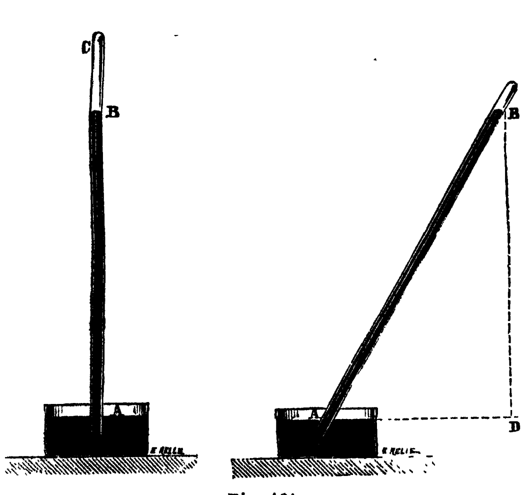


Fig. 161.

La hauteur soulevée ne dépend ni du diamètre ni de la forme du tube. Si l'on *incline* le tube, la distance verticale BD des niveaux dans le tube et dans la cuvette reste invariable (fig. 161).

Interprétation de l'expérience du baromètre. — Puisque la masse entière du mercure est en équilibre,

dans le tube et dans la cuvette, la pression doit être la même sur deux surfaces égales du plan horizontal de la surface libre dans la cuvette. Dans le tube, la surface *mn* (fig. 162) ne supporte que la pression due au poids de la colonne soulevée, puisque la chambre barométrique est vide. Au-dessus de *m'n'*, en dehors, l'air extérieur agit seul, sa pression est donc celle de la colonne soulevée dans le tube (1).

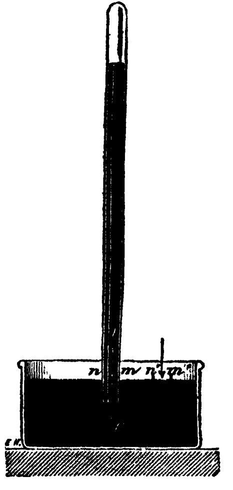


Fig. 162.

146. Valeur de la pression atmosphérique. — La pression exercée par l'atmosphère sur une surface de 1 centimètre carré est égale au poids d'une colonne de mercure qui a pour base 1 centimètre carré et pour hauteur la *différence verticale des niveaux dans le tube et dans la cuvette.*

Pour sa hauteur *moyenne* de 76 centimètres, la colonne soulevée pèse en grammes : $1.76.13{,}6 = 1033^{gr}$. Son poids, en dynes, vaut à Paris : $1033.981 = 1{,}014.10^6$ un peu plus d'une *mégabarye*. On l'appelle pression *d'une atmosphère.*

Les hauteurs de différents liquides qui exerceraient sur une même surface S une pression égale à la pression atmosphérique, représentée par $ShD = Sh'D'$, sont en *raison inverse de leurs densités,*

$$\frac{h'}{h} = \frac{D}{D'}.$$

La hauteur h' de la colonne d'eau qui mesure la pression atmosphérique est $h' = \frac{hD}{D'}$ $\left(D = 13{,}6;\ D' = 1\right)$; $h' = 76.13{,}6 = 1033^{cm}$ ou $10^m{,}33$. Dans une vérification de Pascal, avec un long tuyau de verre fermé par le haut, la colonne soulevée dépassait 10 mètres (2).

Expérience du Puy-de-Dôme. — Si c'est bien au poids de l'air qu'est due l'ascension du mercure dans le baromètre, la hauteur de la colonne doit être plus faible quand on s'élève dans l'atmosphère, puisque les couches d'air laissées au dessous ne pressent plus sur le mercure de la cuvette. Sur les indications de Pascal, l'expérience

(1) Si la section *mn* devient double, le poids du mercure est double, mais la surface sur laquelle l'air transmet sa pression est également double.

(2) Si la hauteur du tube est inférieure à $10^m{,}33$ dans le cas de l'eau (à 76 centimètres dans le cas du mercure), le liquide soulevé remplit complètement le tube et exerce contre le haut du tube une pression d'autant plus forte que la différence entre $10^m{,}33$ et la hauteur du tube est plus grande.

du tube de Torricelli fut faite, en même temps, au bas et au sommet du Puy-de-Dôme; la *colonne barométrique fut trouvée, en haut, moindre qu'en bas* de 8 centimètres et demi.

Pascal avait déjà constaté, qu'en haut de la tour Saint-Jacques, la colonne de mercure était inférieure de 4mm3 à sa hauteur au bas de la tour (1). Pour de petites hauteurs, le baromètre baisse d'environ un millimètre quand on s'élève de 10 mètres.

147. Effets de la pression atmosphérique. — La pression atmosphérique passe habituellement inaperçue parce que les pressions exercées par l'air sur un objet s'équilibrent sensiblement (2). On la démontre toutefois par diverses expériences.

Ayant rempli d'eau une éprouvette, on applique une feuille de papier sur ses bords. Si on retourne l'éprouvette, la pression atmosphérique maintient le papier et l'eau ne tombe pas.

Crève-vessie. — On applique sur la platine d'une machine pneumatique le bord *bien dressé* d'un cylindre de verre qui est fermé à son ouverture supérieure par une vessie tendue et solidement fixée sur le pourtour (fig. 163). Pressée par l'air intérieur et par l'air extérieur, la membrane supporte la même pression sur ses deux faces et reste plane. Si l'on fait le vide au dessous, l'air extérieur exerce sur la face externe une pression qui creuse la membrane jusqu'au moment où elle éclate avec bruit.

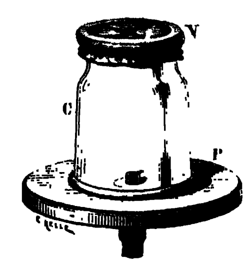


Fig. 163.

Hémisphères de Magdebourg. — Ce sont deux demi-sphères creuses en laiton de 10 centimètres de diamètre environ. Leurs rebords s'appliquent l'un contre l'autre et un cuir annulaire enduit de suif rend la fermeture hermétique. L'un des hémisphères porte un tube à robinet que l'on visse sur la platine d'une machine pneumatique, afin de faire le vide dans l'appareil; l'autre hémisphère porte un anneau. Quand l'air intérieur a eté extrait et que le robinet est fermé, il faut un effort

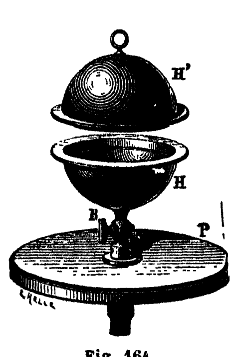


Fig. 164.

(1) Ces expériences confirmaient l'explication de Torricelli et démontraient que c'est à la pression de l'air que sont dus les effets attribués jusque-là à l'*horreur du vide*.

(2) Par la respiration, la pression atmosphérique est transmise aux liquides de nos tissus qui sont ainsi également pressés à l'intérieur et à l'extérieur.

considérable pour vaincre la pression qui les maintient appliqués. Si l'on ouvre le robinet R, l'air rentre en sifflant, et les hémisphères se séparent (fig. 164), la pression extérieure étant équilibrée par la pression intérieure.

Résultante des pressions exercées par un gaz sur les parois d'un vase. — Ces pressions ont une résultante verticale, dirigée de haut en bas et égale au poids du gaz.

Par exemple, dans un tube de verre vertical qui renferme de l'air au-dessus d'une colonne de mercure, cet air exerce de haut en bas une pression p sur le mercure ; de bas en haut il exerce sur la paroi supérieure du tube une pression p' inférieure à p. La résultante $p - p'$ est le poids du gaz. Les pressions horizontales se font équilibre.

148. Résultante des pressions exercées par un gaz sur les solides immergés. — Le **principe d'Archimède** est applicable aux gaz comme aux liquides, en raison de la mobilité de leurs molécules et de leur poids ; un *corps plongé dans un gaz éprouve donc une poussée verticale* dirigée de bas en haut, égale au poids du gaz qu'il déplace. Cette poussée se démontre par le baroscope (fig. 165).

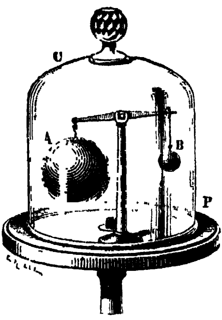


Fig. 165.

Le **baroscope** est un fléau de balance portant à l'une de ses extrémités une petite sphère pleine B et à l'autre une grosse sphère creuse A. Elles se font équilibre dans l'air. Si l'on fait le vide autour du baroscope, le fléau *s'incline du côté de la grosse sphère*. La grosse sphère, plus pesante dans le vide que la petite, ne lui fait équilibre dans l'air que parce qu'elle déplace un volume d'air plus grand et éprouve par conséquent une plus forte poussée [1].

L'effort exercé par une des sphères à l'extrémité de l'un des bras du fléau est égal à son *poids apparent*, ou à la différence entre son poids réel et la poussée que le gaz lui fait subir.

Soit M la masse de la grosse boule, V son volume ; M' la masse de la petite boule et V' son volume ; a la densité de l'air, l'équation :

$$(M - Va)g = (M' - V'a)\,g \quad (1)$$

exprime que le poids apparent des deux boules est le même dans l'air [2].

(1) Dans l'expérience de vérification du principe d'Archimède, les cylindres suspendus au plateau de la balance éprouvent des poussées de l'air ; ces poussées restent les mêmes dans les deux équilibres, car l'eau versée dans le cylindre creux se substitue, au point de vue de la poussée dans l'air, au cylindre plein qui est plongé dans l'eau.

(2) Si les bras du fléau ne sont pas égaux, l et l' désignant les bras du fléau, on a :

$$(M - Va)\,gl = (M' - V'a)\,gl'$$

Si l'on supprime les poussées en faisant le vide autour du baroscope, l'excès de poids de la grosse boule est $(M - M')g$; or, d'après (1), on a :

$$(M - M')\,g = (V - V')\,ag \quad (2)$$

Si le gaz intérieur a été seulement raréfié, sa densité a' est inférieure à celle de l'air, l'excès du poids apparent de la grosse boule devient :

$$(M - M')g - (V - V')\,a'g \quad \text{ou} \quad (a - a')\,(V - V')\,g \quad (3)$$

Si l'on comprime l'air autour du baroscope ou si l'on remplace l'air par un gaz plus lourd, tel que l'acide carbonique, la grosse boule est soulevée. La force soulevante est : $(a' - a)\,(V - V')\,g$.

149. Corrections des pesées. — L'effort exercé par un corps sur un plateau de balance est son *poids apparent*. On a son poids réel ou son poids dans le vide, en ajoutant au poids apparent la poussée dans l'air. Les pesées doivent donc subir une correction s'adressant à la fois aux corps pesés et aux poids qui n'ont que dans le vide leur valeur marquée.

Désignons par D, δ et a les densités du corps, du métal des poids et de l'air. Le poids réel d'un corps de masse x est xg, son volume $\frac{x}{D}$, le poids de l'air déplacé est $\frac{x}{D}\,ag$. On a $xg - \frac{x}{D}\,ag$ pour l'effort exercé par le corps sur le plateau de la balance.

Le poids réel du poids marqué M est Mg, le poids de l'air déplacé est $\frac{M}{\delta}\,ag$; l'effort exercé par le poids est donc $Mg - \frac{M}{\delta}\,ag$.

Les deux efforts étant égaux dans la double pesée, on écrit :

$$xg\left(1 - \frac{a}{D}\right) = Mg\left(1 - \frac{a}{\delta}\right).$$

On a ainsi la masse x que l'on aurait obtenue en opérant dans le vide :

Pour deux masses x et x' : $\quad x = M\,\dfrac{1 - \frac{a}{\delta}}{1 - \frac{a}{D}}; \qquad x' = M'\,\dfrac{1 - \frac{a}{\delta}}{1 - \frac{a}{D'}}.$

Le rapport $\frac{x}{x'}$ *des masses de deux corps ou le rapport de leurs poids est indépendant des poussées exercées sur les poids marqués* (de densité δ).

Si les deux corps sont de même densité, le rapport de leurs masses est indépendant des poussées exercées sur les corps et sur les poids.

La correction d'une pesée est souvent très faible pour un corps solide ou liquide, D, δ et D' étant considérables par rapport à a [1].

150. Corps immergés et corps flottants. — Le principe d'Archimède conduit aux conséquences établies pour les liquides.

1° Un corps *plus lourd* que le gaz qu'il déplace, *descend* entraîné par son poids apparent.

2° S'il a le *même poids* que le gaz déplacé, il se maintient en place.

(1) Soit une masse d'eau pesée avec un poids marqué de platine de 1 kilogramme $M = 1000$; $\delta = 21$, $D = 1$, $a = 0{,}0018$. La masse d'eau qui fait équilibre dans l'air à 1 kilogramme de platine est $x = 1001^{gr},27$.

3° S'il est *moins lourd*, la poussée est supérieure à son poids, et il *monte* jusqu'à des couches, où la poussée et le poids sont égaux.

Ces cas sont présentés par la fumée, les nuages, les aérostats.

BAROMÈTRES

151. L'expérience de Pascal a fait voir que la colonne de mercure soulevée dans le tube de Torricelli varie avec l'altitude. En outre, en un même lieu, elle subit journellement des variations; le mercure monte ou descend, surtout au voisinage des changements de temps.

Un baromètre est un appareil qui mesure avec précision, à tout instant, en tout lieu, la pression atmosphérique.

En un même lieu et à une même température, les pressions de l'atmosphère sont proportionnelles aux hauteurs barométriques; de là vient l'usage de représenter, *pour la comparaison,* la pression atmosphérique par la hauteur barométrique correspondante.

Construction d'un baromètre. — L'appareil de Torricelli construit avec un soin spécial constitue le *baromètre à cuvette.*

1° Il convient d'employer du *mercure pur* parce que le mercure impur adhère au verre et n'a pas une densité bien définie.

2° Il faut *éviter dans la chambre barométrique tout gaz* qui déprimerait la colonne; pour cela, il ne doit pas rester, entre le mercure et le tube, d'air interposé qui gagnerait peu à peu le haut du tube. De même le mercure et le tube seront parfaitement desséchés.

On prend un tube A propre et sec, de 7 à 8 millimètres de diamètre intérieur et de 85 centimètres environ de longueur; il est fermé à un bout et terminé à l'autre extrémité par une partie plus étroite D qui est soudée à un petit ballon B muni de deux tubulures *m* et *p* (fig. 166). La tubulure *m*, effilée et fermée, plonge dans du mercure pur et sec chauffé vers 120°. La tubulure *p* communique par un robinet avec une machine pneumatique. Le tube étant chauffé vers 100°, sur une grille à gaz légèrement inclinée, on fait le vide dans l'appareil; on brise ensuite la pointe de la tubulure

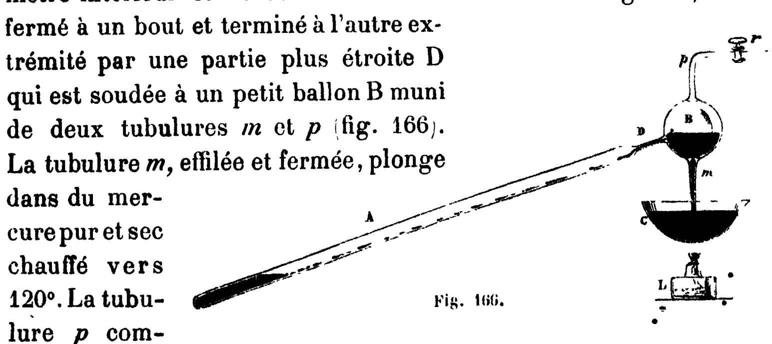


Fig. 166.

m, le mercure monte en B et coule lentement dans le tube A. Le remplissage étant terminé et l'appareil refroidi, on détache le ballon en D d'un trait de lime. En chauffant ensuite légèrement le tube, le mercure déborde en D. On bouche alors l'extrémité avec le doigt, on renverse le tube dans une cuvette à mercure et on le redresse (1).

152. Baromètre normal. — Le tube et la cuvette sont fixés à une planche assujettie contre un mur. Pour lire la distance du sommet de la colonne mercurielle au niveau dans la cuvette, on adapte à l'une des parois de la cuvette une potence qui porte un écrou dans lequel monte ou descend une vis en fer *v* terminée par deux pointes (fig. 168). En tournant la vis, on amène sa pointe inférieure en contact avec le mercure de la cuvette; cette pointe et son image vue dans le mercure paraissent alors se toucher; on mesure ensuite au cathétomètre (**66**) la distance de la pointe supérieure au sommet du mercure dans le tube. On ajoute à cette hauteur la distance verticale des deux pointes de la vis, mesurée à l'avance. Souvent, pour remplacer la vis à deux pointes, un tube en verre en forme d'S, renflé en G, constitue avec la cuvette un système de vases communiquants. On mesure la différence entre le niveau dans le tube barométrique et le niveau A′ dans le renflement G (fig. 167). L'emploi du cathétomètre n'oblige pas à vérifier la verticalité du tube.

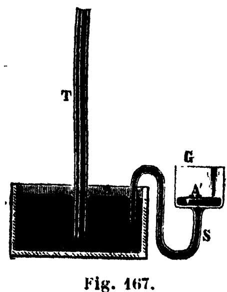
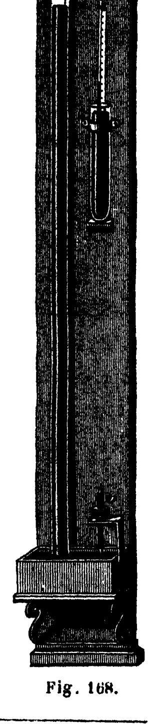


Fig. 167.


Fig. 168.

Si le tube a moins de 3 centimètres de diamètre, le mercure forme un ménisque convexe au sommet de la colonne et se tient un peu plus bas que dans un tube plus large. La **dépression capillaire** s'ajoute à la hauteur observée, elle est d'autant plus grande que le tube est plus étroit.

(1) La surface du mercure doit paraître *continue* et *brillante* tout le long du tube. Si l'on incline un peu rapidement le tube de manière à amener son sommet à une distance verticale du niveau de la cuvette inférieure à la hauteur barométrique, le mercure doit venir frapper un *coup sec* contre l'extrémité supérieure, s'il n'existe plus de fluide élastique pour amortir le choc. En raison du vide de la chambre barométrique, si la profondeur de la cuvette permettait d'enfoncer le tube, la différence des niveaux dans le tube et dans la cuvette ne changerait pas.

Comme les observations n'ont pas toujours lieu à une même température, on les rend comparables en calculant pour chacune la hauteur H_0 du mercure à 0^0 qui exerce la même pression que la hauteur H observée à t^0. La température est donnée par un thermomètre plongé dans un tube de même diamètre que le tube barométrique (fig. 168), et contenant du mercure.

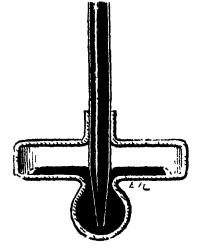
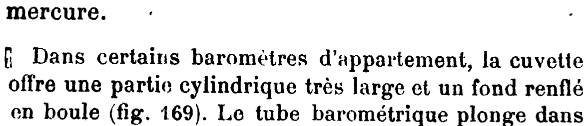


Fig. 169.



Dans certains baromètres d'appartement, la cuvette offre une partie cylindrique très large et un fond renflé en boule (fig. 169). Le tube barométrique plonge dans la boule. Le niveau s'étale en une *large goutte* sur le fond plan de la partie cylindrique sans atteindre les bords verticaux et se maintient à une hauteur sensiblement invariable. L'échelle est verticale et fixe, son zéro correspond au niveau de la goutte dans la cuvette.

153. Baromètre de Fortin. — Le baromètre de Fortin, dont le tube est plongé dans une *cuvette à fond mobile*, n'exige pas, comme le baromètre normal, une installation fixe.

Cuvette (fig. 170). — La cuvette est un cylindre de verre compris entre deux anneaux de buis; son fond est un sac de peau de chamois qu'on soulève ou qu'on abaisse par une vis V. A chaque observation, on déplace le fond mobile et on amène le mercure en contact avec une pointe en ivoire v qui traverse le couvercle de la cuvette. Au contact, la pointe d'ivoire touche son image, vue par réflexion.

Lecture sur le tube. — L'étui métallique qui entoure le tube est percé de deux fentes longitudinales parallèles et opposées, laissant voir le ménisque du mercure (fig. 171). Une graduation, qui part de la pointe d'ivoire, suit le bord de l'une des fentes, le long de l'étui.

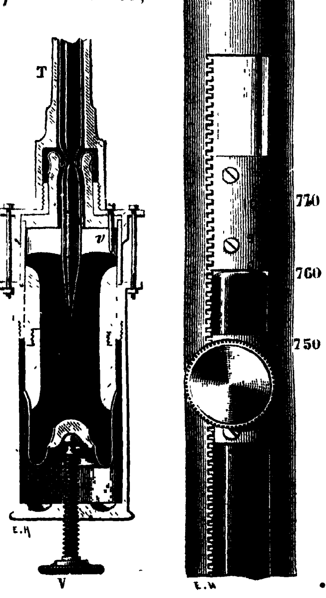


Fig. 170. Fig. 171.

Un curseur se déplace le long de l'étui métallique. On fait en sorte que le plan horizontal passant par les bords supérieurs de deux échancrures opposées du curseur soit tangent au sommet du mé-

nisque dans le tube. On lit à ce niveau le numéro de l'échelle [1].

Suspension du baromètre. — On peut simplement suspendre le baromètre contre un mur comme un fil à plomb, par l'anneau qui surmonte sa gaine. En voyage, on fixe le baromètre à un trépied (fig. 172) à l'aide d'une *suspension de Cardan* qui permet au tube de tourner librement *autour de deux axes croisés rectangulairement aa' et bb'* passant par le centre de la section du tube (fig. 173); le tube prend lui-même par son poids une position verticale. Les branches du trépied, en se rapprochant, forment une canne creuse qui protège le baromètre dans son transport.

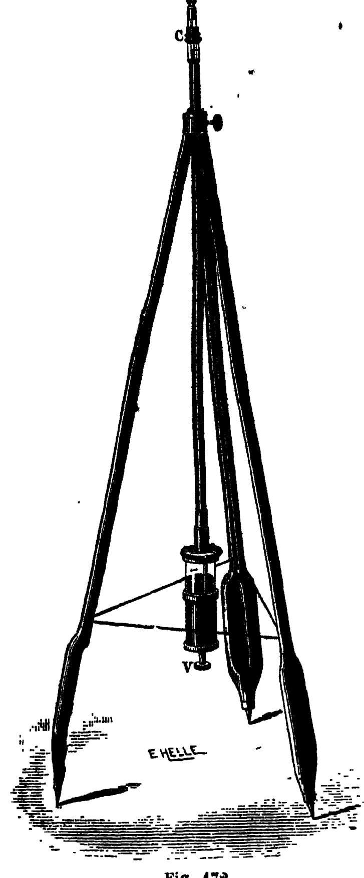


Fig. 172.

Lecture. — L'axe du tube étant vertical, on fait affleurer dans la cuvette le mercure avec la pointe d'ivoire, puis on amène le rayon visuel qui passe par les deux bords du curseur à être tangent au sommet du ménisque. La hauteur barométrique est lue sur la graduation [2].

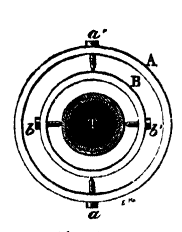


Fig. 173.

154. Baromètre à siphon. — Dans ce baromètre, la cuvette n'est plus indépendante du tube. Il est formé d'un tube de verre recourbé, à deux branches parallèles et inégales : la plus courte est

(1) Dans la figure, la première division du vernier qui coïncide avec une division de la règle est la 8e. Le vernier étant au dixième, la lecture est 760,8.

(2) *Transport de l'instrument.* — En relevant avec la vis le fond de la cuvette, l'air qui surmonte la cuvette est chassé à travers une peau de chamois qui fixe le tube à la cuvette : on fait remonter le mercure de la cuvette jusqu'à ce qu'on éprouve une légère résistance. Le tube est alors rempli jusqu'au sommet. Le baromètre peut être retourné et déplacé, sans choc du mercure capable de briser le tube, et sans rentrée d'air.

ouverte, l'autre est fermée et sa longueur atteint environ 1 mètre. La différence des niveaux du mercure dans les deux branches fait équilibre à la pression atmosphérique qui agit en *m*. Une échelle divisée, dont le zéro est placé vers le milieu du tube, porte une graduation ascendante vers *c* et une graduation descendante vers *n*. La somme des deux lectures $h + h'$ représente la pression (fig. 174).

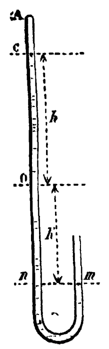


Fig. 174.

Baromètre à cadran. — C'est un baromètre à siphon dont les indications sont amplifiées. Sur le mercure de la branche ouverte flotte une petite masse de fer *m* attachée à un fil qui s'enroule sur une poulie P et soutient à son extrémité un contrepoids *n*. Une aiguille équilibrée CD, fixée sur l'axe de la poulie, parcourt la circonférence d'un cadran divisé. Le flotteur suit le mouvement ascendant ou descendant du mercure et fait tourner la poulie et en même temps l'aiguille. Des frottements de l'axe de la poulie diminuant la sensibilité, on donne un petit coup sur l'instrument au moment où on le consulte (fig. 175).

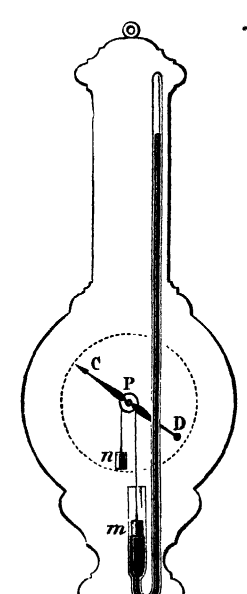


Fig. 175.

155. Baromètre métallique. — Le baromètre de Vidie est un cylindre de laiton aplati, hermétiquement clos et dans lequel on *a fait le vide*. Un ressort empêche la boîte de s'écraser par la pression atmosphérique. La surface supérieure est une lame métallique mince et flexible, à *surface ondulée* (1) (fig. 176), qui s'élève ou s'abaisse proportionnellement à la variation de la pression atmosphérique (analogie avec la membrane du crève-vessie). Les déplacements, très faibles, sont amplifiés et transmis par des leviers articulés à une aiguille mobile sur un cadran. La graduation se fait par comparaison avec un baromètre


Fig. 176.

(1) Si la boîte barométrique n'était pas vide, des variations de pression dues aux changements de température du gaz intérieur agiraient sur la lame métallique.

Les reliefs et les creux de la surface augmentent la flexibilité; ils n'ont pas pour objet d'accroître l'étendue de la surface pressée, car la pression exercée ne dépend que de la projection horizontale de la surface pressée.

à mercure. Comme l'élasticité du métal se modifie lentement, la graduation doit être vérifiée de temps en temps. Ces baromètres sont facilement transportables et mesurent les variations de pression indépendamment de la gravité.

156. Représentation graphique des pressions. — On représente par des courbes les variations de la pression atmosphérique; des lignes horizontales équidistantes, correspondent aux pressions et sont numérotées 730^{mm}, 740^{mm}. Des verticales, également équidistantes, correspondent aux heures (fig. 177). Une courbe continue passant par les différents points qui se rapportent aux pressions observées donne une idée des pressions plus nette qu'un tableau.

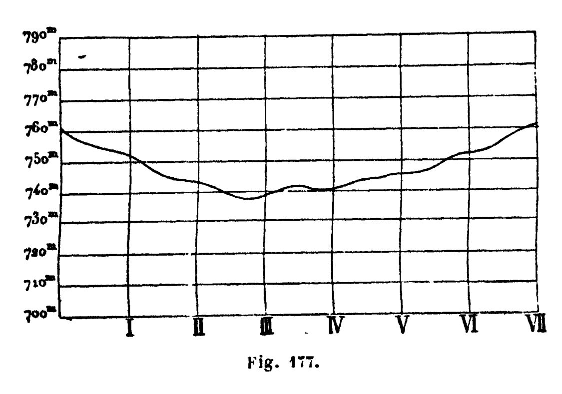


Fig. 177.

Baromètres enregistreurs. — Les baromètres enregistreurs tracent d'une façon continue la courbe des pressions.

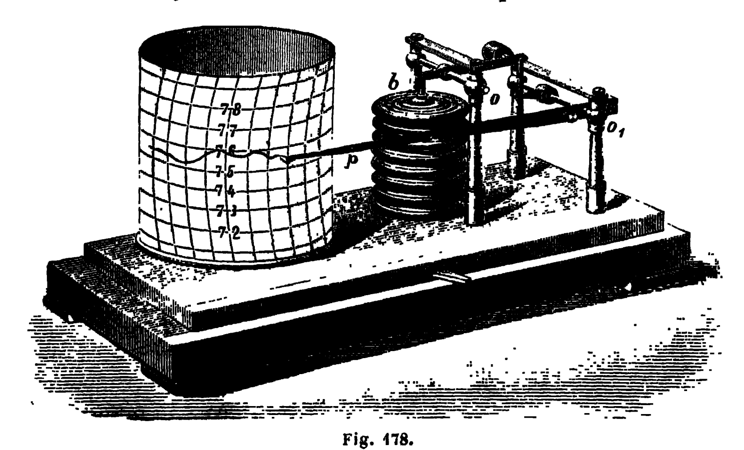


Fig. 178.

Plusieurs boîtes ondulées *b*, vides d'air et munies de ressorts antagonistes, sont vissées l'une sur l'autre; la boîte inférieure repose sur un plan fixe (fig. 178). La somme de leurs flexions est transmise par une série d'articulations à une longue aiguille dont l'extrémité

libre porte une plume chargée d'encre. Cette plume appuie sur une feuille de papier quadrillé qui recouvre un cylindre vertical auquel un mécanisme d'horlogerie fait faire un tour en 24 heures.

157. Mesure des hauteurs par le baromètre. — Soit h la différence des pressions à deux stations A et B; la densité de l'air intermédiaire étant supposée constante, comme on peut l'admettre pour une centaine de mètres, les hauteurs équivalentes de mercure et d'air, h et x, sont en raison inverse des densités.

$$\frac{x}{h} = \frac{13,6}{0,0013}.$$

0,0013 poids en grammes d'un centimètre cube d'air.

Cette proportion devient inexacte quand on s'élève, car la densité de l'air et la température décroissent; une formule spéciale exprime alors une distance verticale, d'après les pressions barométriques et les températures aux deux stations.

158. Variations barométriques. — En un même lieu, par un

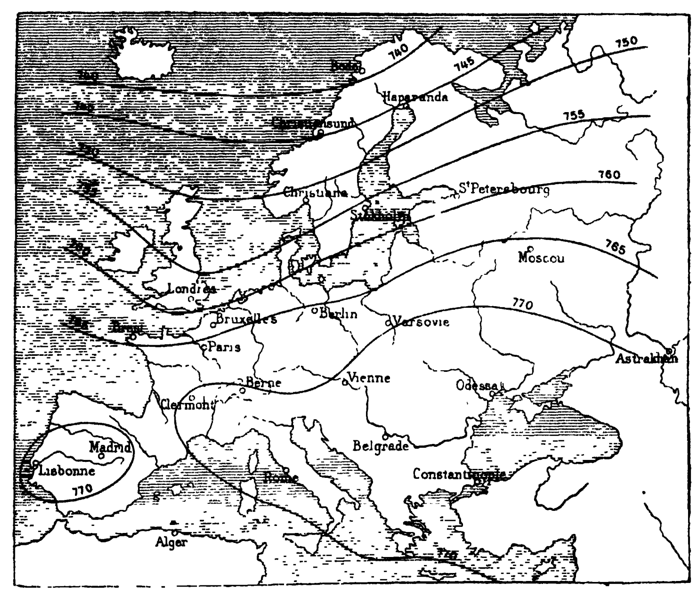


Fig. 179.

temps calme, la hauteur barométrique présente, en 24 heures, deux maxima et deux minima (1). Très régulières au voisinage de l'équa-

(1) A Paris, l'écart entre le maximum et le minimum est faible (à peine 1 millimètre); les maxima ont lieu vers dix heures du matin et dix heures du soir, les minima vers quatre heures du matin et quatre heures du soir.

teur, les variations diurnes sont souvent masquées dans nos régions par des variations accidentelles liées aux circonstances atmosphériques. Dans l'ouest de l'Europe, le plus souvent le temps se met au beau si le baromètre monte peu à peu; une baisse graduelle est un signe de mauvais temps. Habituellement, le baromètre baisse *brusquement* à l'approche des tempêtes.

Courbes isobares. — Les hauteurs barométriques enregistrées dans les divers observatoires de l'Europe et réduites au niveau de la mer (**217**), sont communiquées télégraphiquement au Bureau central météorologique de Paris. On trace pour chaque jour les courbes *isobares* ou de même pression barométrique (fig. 179). Ces courbes représentent à un moment déterminé l'état général de l'atmosphère; l'examen des déplacements des courbes de même pression donne des indications utiles pour la prévision du temps.

COMPRESSIBILITÉ DES GAZ

D'après l'expérience du briquet à air (**54**), les gaz sont très compressibles; en outre, la réaction exercée par le gaz sur les parois du vase ou sa *force élastique,* croît lorsque son volume diminue.

Mariotte a fait connaître la relation simple qui existe, à *température constante,* entre la force élastique d'un gaz et son volume.

159. Loi de Mariotte. — Une masse de gaz, de volume V sous la pression p, prend, sous des pressions $2p$, $3p$..., des volumes $\frac{V}{2}, \frac{V}{3}\cdots$, et des volumes 2V, 3V... sous des pressions $\frac{p}{2}, \frac{p}{3}\cdots$

V et V′ étant les volumes d'une masse de gaz, à une même température, sous des pressions p et p', on aura :

$$\frac{V}{V'} = \frac{p'}{p} \quad \text{ou} \quad pV = p'V'.$$

D'où : *A température constante, les volumes d'une masse de gaz sont inversement proportionnels aux pressions qu'elle supporte;* ou encore : *Le produit du volume d'une masse de gaz par la pression qu'elle supporte est constant.*

Le rapport des forces élastiques étant égal au rapport des colonnes de mercure H et H′ qui leur font équilibre, la loi de Mariotte s'écrit encore :

$$\frac{V}{V'} = \frac{H'}{H} \quad \text{ou} \quad HV = H'V'.$$

La loi de Mariotte est représentée graphiquement par la courbe de la figure 180 où l'on a pris comme abscisses les volumes d'une masse donnée de gaz et comme ordonnées les pressions correspondantes.

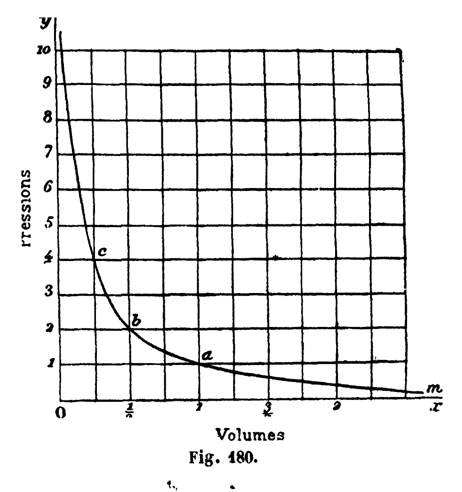


Fig. 180.

On dit encore : *La densité d'un gaz, à température constante, varie proportionnellement à la pression qu'il supporte.*

En effet, si le volume d'un gaz est réduit au tiers de sa valeur, chaque nouveau centimètre cube renferme la même masse que 3 des centimètres cubes anciens et la densité ou la masse de l'unité de volume devient triple. La densité est ainsi proportionnelle à la pression, puisque la pression qui a réduit le volume du gaz au tiers est triple de la pression primitive.

160. Vérification de la loi de Mariotte. — L'appareil qui est figuré pour vérifier la loi de Mariotte comprend : 1° un tube cylindrique A terminé à l'une de ses extrémités par un robinet de verre R et divisé en centimètres cubes; 2° un réservoir C ouvert aux deux bouts. Le tube et le réservoir sont mobiles et reliés par un tuyau de caoutchouc épais. Ils contiennent du mercure. Une échelle verticale graduée se trouve entre le tube et le réservoir.

Le robinet R étant ouvert, on dispose d'abord le réservoir C de manière que les niveaux du mercure *a* et *c*, soient dans un même plan horizontal, le niveau *a* dans le tube se trouvant à une certaine distance du robinet, puis on *ferme* le robinet.

Les niveaux *a* et *c* étant les mêmes, le mercure est également pressé sur le plan horizontal de ses surfaces libres, et *la force élastique de l'air de la branche fermée est égale à la pression atmosphérique.*

I. Pressions supérieures à la pression atmosphérique. — On soulève le réservoir C et on abaisse le tube A; le mercure monte dans le tube et comprime l'air. Quand le volume de l'air, lu sur la graduation du tube, est réduit de moitié, on maintient fixes le réservoir et le tube et on lit sur l'échelle intermédiaire la distance verticale a_1c_1 des niveaux du mercure. Cette distance est égale

à la pression barométrique (fig. 181). La force élastique du gaz fait équilibre à la colonne de mercure a_1c_1 accrue de la pression atmosphérique qui s'exerce en C, elle vaut donc deux atmosphères : *elle est devenue double pour un volume réduit à moitié.*

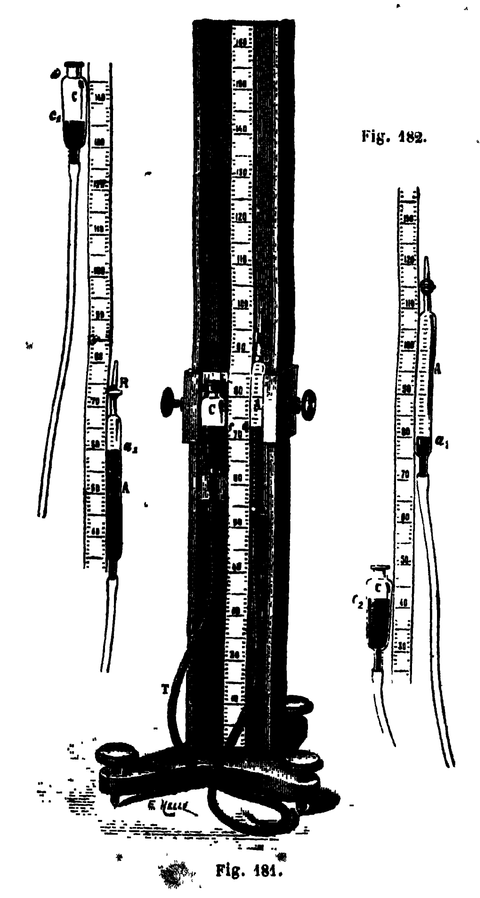


Fig. 181.

Fig. 182.

Si le tuyau de caoutchouc est assez long, on réduit au tiers le volume initial du gaz dans le tube A; la distance verticale a_1c_1 des niveaux devient égale à deux fois la colonne barométrique; en y ajoutant la pression atmosphérique, on a trois atmosphères : *la force élastique est triple pour un volume réduit au tiers.*

II. Pressions inférieures à la pression atmosphérique. — Abaissons le réservoir C et élevons le tube A, le volume de l'air emprisonné augmente en même temps que a_2 passe au-dessus de c_2. La pression du gaz, augmentée de la pression de la colonne de mercure a_2c_2, fait équilibre à la pression atmosphérique H qui s'exerce sur le mercure en C (fig. 182). Lorsque le volume du gaz a doublé, la colonne a_2c_2 est égale à $\frac{H}{2}$; la pression qui complète la pression $\frac{H}{2}$, est H; c'est la force élastique du gaz.

En élevant le tube A de manière à tripler le volume primitif du gaz, la colonne a_2c_2 vaut $\frac{2H}{3}$; la pression $\frac{H}{3}$, complémentaire de H, est la force élastique du gaz.

Lorsque le volume est devenu double, triple, etc., la force

élastique est réduite à la moitié, au tiers de sa valeur initiale (1).

161. Vérification de la loi de Mariotte par des pesées. — A température constante, le *poids d'un gaz* de volume invariable *est, comme sa densité, proportionnel à la pression.*

D'après cela, ayant fait le vide dans un ballon, on le pèse. On le remplit ensuite d'un gaz sous une pression p, l'accroissement de poids est le poids du gaz qui remplit le ballon à la pression p. Les accroissements de poids du ballon rempli du même gaz, sous des pressions p et p', sont proportionnels à ces pressions.

162. Pressions notablement supérieures à la pression atmosphérique. — La loi de Mariotte, n'est pas la loi rigoureuse de la compressibilité des gaz, quand la pression surpasse notablement la pression atmosphérique.

Pour le constater, on place l'un à côté de l'autre, sur une cuvette à mercure, deux tubes gradués semblables. Ils renferment des volumes égaux d'air et d'un gaz facilement liquéfiable : acide sulfureux ou ammoniaque. Les tubes et la cuvette sont introduits dans un épais cylindre de verre AB plein d'eau et surmonté d'un corps de pompe où s'enfonceun piston à vis V. On comprime l'eau à l'aide du piston, la pression se transmet au mercure et à chacun des gaz. Égaux sous une pression H, les volumes sont différents sous une pression nH (fig. 183) : *les gaz facilement liquéfiables sont plus compressibles que l'air.*

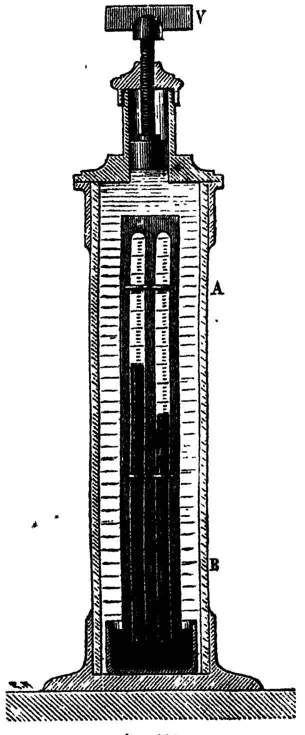


Fig. 183.

Les gaz difficilement liquéfiables, eux-mêmes : azote, hydrogène, air atmosphérique n'obéissent pas à la loi de Mariotte. Les écarts suivant une loi régulière, on ne peut pas les attribuer à des erreurs de lecture ; ils varient d'un gaz à l'autre. Des recherches précises de Regnault, à la température ordinaire et poussées jusqu'à 27 atmosphères, ont été étendues par Amagat.

Température ordinaire. — 1° Pour l'hydrogène, qui est le plus diffi-

(1) Les brusques variations de volume de gaz sont accompagnées de variations de température ; on attend le retour à la température ambiante pour faire les lectures.

cilement liquéfiable des gaz usuels, la compressibilité est *inférieure* à celle de la loi de Mariotte; la différence, d'abord très faible, croît avec la pression (le produit pV augmente avec la pression). La résistance à la compression finit par devenir comparable à celle d'un liquide.

2° Les gaz difficilement liquéfiables, autres que l'hydrogène, offrent d'abord une compressibilité un peu *supérieure* à celle de la loi de Mariotte, la réduction du volume au dixième par exemple a lieu par une pression inférieure à dix fois la pression initiale; les différences croissent avec la pression (le produit pV diminue quand la pression augmente). En faisant croître la pression, la compressibilité passe par un **maximum** (1) (minimum du produit pV), puis elle décroît et on atteint une pression où le gaz suit la loi de Mariotte. Pour des pressions encore plus fortes, la compressibilité devient, *comme pour l'hydrogène, inférieure* à celle de la loi de Mariotte.

3° Les gaz liquéfiables par la pression à la température ordinaire, tels que l'acide carbonique, l'acide sulfureux, l'ammoniaque, offrent pour des pressions peu élevées des écarts notablement plus accentués que ceux de l'air et de l'azote, et, pour ces gaz, la loi de Mariotte cesse d'être exacte dès une pression de 3 ou 4 atmosphères.

Températures élevées. — Quand on élève la température, les écarts de la loi de Mariotte sont moindres qu'à la température ordinaire. L'hydrogène continue à offrir une compressibilité *inférieure;* à une température assez élevée, tous les gaz se comportent comme l'hydrogène (2).

La loi de Mariotte n'est rigoureuse pour aucun gaz; mais, pour de faibles écarts de pressions et surtout avec des gaz éloignés, à la température ordinaire, de leur liquéfaction, comme l'*azote,* l'*air,* l'*hydrogène*, la loi de Mariotte suffit dans les *calculs usuels*.

MANOMÈTRES

Les manomètres *sont des instruments qui servent à mesurer la pression,* par centimètre carré, de gaz ou de vapeurs en vase clos. Dans les mesures industrielles on exprime les pressions en kilogrammes ou en atmosphères ($1^{kg},033$) (on néglige les petites variations du kilogramme avec le lieu de l'observation).

Dans les mesures précises on évalue les pressions en dynes.

(1) A 15°, le maximum de compressibilité a lieu pour l'azote vers 60 atmosphères; vers 110 atmosphères, le gaz a le volume que lui assigne la loi de Mariotte.

(2) *Résultats généraux.* — 1° Aux températures *inférieures à la température critique,* le gaz se comprime plus que ne l'indique la loi de Mariotte jusqu'à la liquéfaction. — 2° A une température *supérieure à la température critique*, mais pas trop élevée, le gaz se comprime *d'abord plus* (il y a maximum de compressibilité, ou minimum du produit *pv*), *puis moins* que suivant la loi de Mariotte. La température s'élevant suffisamment, le maximum de compressibilité disparaît. A la température ordinaire, l'hydrogène se trouve déjà dans ces dernières conditions, mais à des températures basses qui le rapprochent de son point critique, l'hydrogène présente comme les autres gaz un maximum de compressibilité.

MANOMÈTRES INDUSTRIELS

163. Manomètre à air libre (fig. 184). — Il consiste en un tube recourbé contenant du mercure. La pression du gaz s'exerce par la branche la plus courte, la longue branche est ouverte. Les niveaux du mercure sont dans un même plan horizontal AB quand la pression du gaz est égale à la pression atmosphérique. Le mercure descend dans la courte branche et s'élève dans l'autre si la pression du gaz dépasse la pression atmosphérique. La différence verticale des niveaux étant A'B' = h, la pression du gaz est le poids d'une colonne de mercure de 1 centimètre carré de base et de hauteur H + h, H hauteur de la colonne barométrique qui agit sur B'. Si $h = 76$, la pression du gaz sera de deux atmosphères. Avec des branches de même diamètre, la dépression au-dessous de A dans l'un des tubes est égale à l'élévation au-dessus de B dans l'autre. Les lectures sont faites sur une échelle divisée, verticale, disposée entre les deux branches.

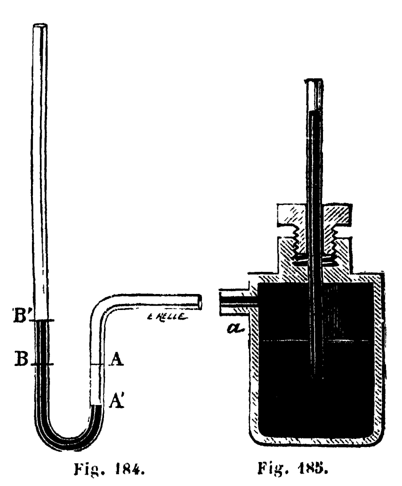


Fig. 184. Fig. 185.

Souvent le manomètre à air libre a la forme d'une large cuvette en fer contenant du mercure et présentant à sa partie supérieure une ouverture fermée par un bouchon à vis. Dans ce bouchon est mastiqué un long tube ouvert à ses deux extrémités et plongeant dans la cuvette (fig. 185). Le gaz ou la vapeur pénètre par un ajutage latéral a et refoule le mercure de la cuvette. L'élévation du mercure est lue sur une règle divisée verticale, dont le zéro part du niveau dans la cuvette, le diamètre de la cuvette étant assez large pour que la dépression y reste négligeable. La hauteur lue doit être augmentée de la hauteur barométrique. Les manomètres à air libre ne servent que pour des pressions inférieures à 5 atmosphères (1); aux pressions supérieures, leur longueur est embarrassante.

Si le liquide du manomètre à air libre n'est pas du mercure, la différence entre la pression du gaz du récipient et la pression atmos-

(1) Pour une pression de cinq atmosphères, la hauteur lue est égale à 4.76 ou 304 centimètres; l'instrument devrait avoir plus de 3 mètres.

phérique est mesurée par une hauteur h_1 d'un liquide de densité d_1, équivalente à une hauteur h de mercure. D'après la règle des vases communiquants : $h_1 d_1 = h\ 13,6$.

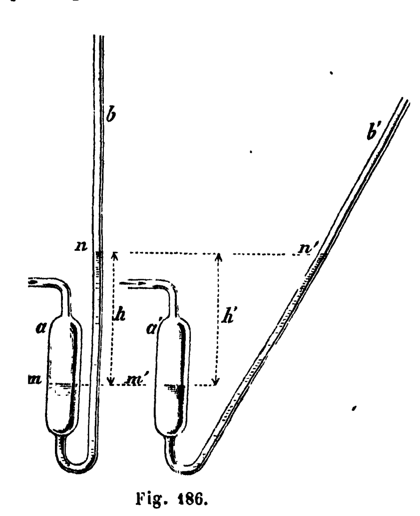


Fig. 186.

C'est avec un manomètre à eau, pour lequel $h_1 = h\ 13,6$ que l'on mesure la pression du gaz d'éclairage, qui ne dépasse la pression atmosphérique que de quelques centimètres d'eau. Le gaz presse en m sur l'eau et produit une dénivellation mn (fig. 186). On augmente la course du liquide, sans que h_1 change, en inclinant le long tube sur lequel se déplace la colonne de sommet n ou n'.

164. Manomètres à air comprimé. — Ces manomètres, réduits à la courte branche d'un tube de Mariotte, renferment une masse d'*air sec* limitée, dont la force élastique augmente quand son volume diminue. Le tube fermé qui contient la masse d'air est relié au réservoir à vapeur par un tube recourbé renfermant du mercure à sa partie inférieure. Le niveau du mercure est le même dans les deux branches du tube recourbé si la pression dans le réservoir est égale à la pression du gaz du manomètre (fig. 187). Le mercure monte dans le tube quand la pression augmente dans le réservoir. Lorsque l'équilibre est atteint, la pression dans le réservoir est la *somme de la pression de l'air comprimé et de la pression du mercure soulevé entre les deux niveaux dans le tube et dans la cuvette* (1).

Les manomètres à air comprimé *se graduent par comparaison*.

Fig. 187. Fig. 188.



165. Manomètres métalliques. — Le manomètre métallique de Bourdon



(fig. 189) se compose d'un tube mince et flexible de laiton, à section

(1) Les petites dimensions du tube fermé rendent ce manomètre aisément transportable, mais avec une chambre à air cylindrique, les niveaux successifs du mercure deviendraient trop voisins pour les pressions élevées (fig. 188). On atténue cette diminution de la sensibilité, aux fortes pressions en effilant le tube manométrique. La fragilité de l'appareil et l'encrassement du tube par l'oxydation lente du mercure au contact de l'air comprimé font préférer les manomètres métalliques.

elliptique (pour être plus déformable), contourné en spirale. Par une de ses extrémités qui est fixe, le tube communique à l'aide d'un robinet avec le réservoir à pression; l'autre extrémité, fermée et libre comme le reste du tube, entraîne une aiguille qui se déplace sur un cadran divisé. Quand la pression augmente à l'intérieur du tube, la spirale *s'ouvre*, ce qui fait avancer l'aiguille sur le cadran (1). Il y a retour quand la pression diminue.

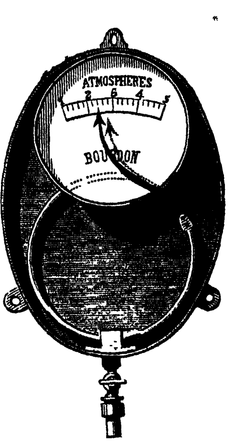


Fig. 189.

Les manomètres métalliques sont très employés; ils *se graduent par comparaison.*

On fait communiquer avec un même réservoir un manomètre à air libre et le manomètre à graduer, puis on exerce dans ce réservoir une pression de 2 atmosphères mesurée par le manomètre à air libre: et on inscrit 2 au point où s'arrête l'aiguille. On continue pour des pressions supérieures.

Par suite des modifications de l'élasticité des pièces métalliques, la graduation doit être vérifiée de temps en temps. ***L'indicateur de Watt*** (**374**) est un manomètre métallique enregistreur.

166. Manomètre à piston. — Pour mesurer industriellement des pressions élevées, on fait usage du manomètre à piston (fig. 190). Il consiste en un corps de pompe cylindrique en acier H, contenant de l'huile et dans lequel s'engage un piston plein P. Un tube étroit T fait communiquer la cavité du cylindre avec le fluide, liquide ou gaz, dont on veut connaître la pression et on charge le piston de poids marqués C (2).

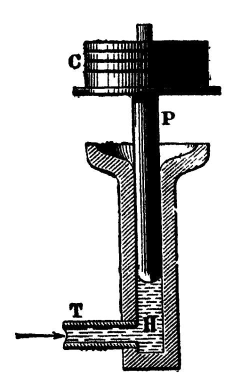


Fig. 190.

MANOMÈTRES DE PRÉCISION

Les manomètres de précision sont des *manomètres à air libre*. Regnault leur a donné pour les gaz, des formes spéciales.

---

(1) Un accroissement de la pression extérieure enroule la spirale. Des baromètres métalliques sont construits sur ce principe.

(2) Avec un piston qui a 4 centimètres carrés de section et pèse 6 kilogrammes, s'il faut une charge de 54 kilogrammes sur la tête du piston pour équilibrer la poussée que le fluide exerce sur l'huile et qui se transmet à la face inférieure du piston, la charge totale sur l'huile sera $54 + 6 = 60$ kilogrammes, ce qui équivaut à une pression de 15 kilogrammes par centimètre carré.

167. Pressions supérieures à la pression atmosphérique. — Pour des pressions comprises entre 1 et 3 atmosphères, le manomètre se compose de deux branches en verre d'inégale longueur et de même diamètre, mastiquées dans un tube de fonte deux fois recourbé. La branche la plus longue C est ouverte (fig. 191), la plus courte A communique avec le récipient à gaz. Un robinet à trois voies R permet de faire communiquer les deux branches entre elles (fig. 192, position 1); ou l'une des branches avec l'extérieur en isolant l'autre (positions 3 et 4), ou les deux branches avec l'extérieur (position 2). On mesure avec un cathétomètre la distance verticale h des niveaux A et C du mercure dans les deux branches. La pression en A est $(H + h) Dg$; la hauteur barométrique en C est H; le poids d'un centimètre cube de mercure dans les conditions de l'expérience est Dg(1).

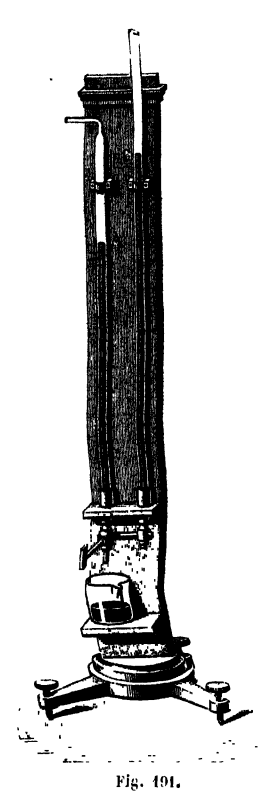


Fig. 191.

168. Pressions inférieures à la pression atmosphérique. — Le récipient communique par un conduit t avec la partie supérieure d'un tube droit d'environ 80 centimètres de hauteur qui plonge dans une cuvette

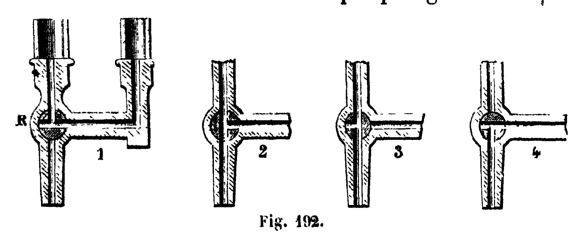


Fig. 192.

(1) Pour des pressions élevées, la branche ouverte est formée d'une série de tubes superposés, présentant chacun deux repères fixes. On détermine exactement la distance de deux repères voisins appartenant à deux tubes consécutifs. Pour chaque observation, il suffit alors de mesurer la distance verticale du niveau du mercure dans la branche ouverte au repère le plus voisin dans la même branche, puis la distance verticale du niveau dans la branche fermée au repère le plus voisin de la branche ouverte. On calcule la distance verticale des niveaux dans les deux branches, et on y ajoute la hauteur barométrique qui s'exerce au sommet de la colonne ouverte.

à mercure. Le mercure a le même niveau dans le tube et dans la cuvette si la pression du gaz est la pression atmosphérique H; il monte dans le tube si la pression du gaz est inférieure à la pression atmosphérique (fig. 193).

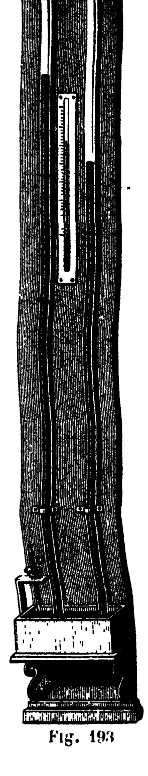


Fig. 193

La pression dans le plan horizontal qui passe par le niveau de la cuvette est la même sur l'unité de surface en dehors et en dedans du tube. En dehors c'est HDg. En dedans, c'est $F + hDg$; F pression du gaz par le tube t, h hauteur du mercure soulevé;

$$F + hDg = HDg, \quad \text{d'où } F = (H - h)\,Dg.$$

Si un baromètre vide est disposé dans la même cuvette à côté du tube manométrique, on n'a pas à mesurer séparément H sur un baromètre et h sur le tube manométrique, ce qui exige quatre lectures, mais seulement la distance verticale $H - h$ dans les deux tubes. L'ensemble forme un *manomètre barométrique*.

Des corrections de capillarité sont nécessaires si le diamètre intérieur des tubes est inférieur à 30 millimètres.

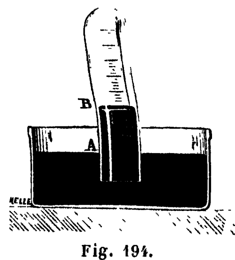


Fig. 194.

169. Mesure de la force élastique d'un gaz dans une éprouvette. — Une éprouvette renferme un volume V de gaz (fig. 194) (1). Soit h la hauteur AB du mercure soulevé; la force élastique du gaz de volume V équivaut à la pression $H - h$, H étant la hauteur barométrique (2). Le volume V′ sous la pression H serait :

$$V' = \frac{V(H - h)}{H}.$$

LOI DU MÉLANGE DES GAZ

170. Loi du mélange des gaz ou loi de Dalton. — Comme les gaz n'ont pas de surface libre, ils ne se superposent pas dans un

(1) Si l'on pouvait abaisser l'éprouvette assez pour que les deux surfaces du liquide dans l'éprouvette et dans la cuve, fussent dans un même plan horizontal, le gaz occuperait un volume V′ à la pression H.

(2) Si le liquide soulevé de hauteur h n'est pas du mercure, H doit être la hauteur de la pression atmosphérique mesurée avec le même liquide.

vase comme des liquides, par ordre de densité, mais ils se mélangent par *diffusion* comme s'ils se pénétraient. Quand on introduit dans une enceinte plusieurs gaz entre lesquels il n'y a pas d'action chimique, chacun d'eux se *répand uniformément dans tout le volume* qui lui est offert, comme s'il était seul, et *la force élastique du mélange est égale à la somme des forces élastiques qu'exercerait chacun d'eux s'il occupait seul le volume total du mélange.*

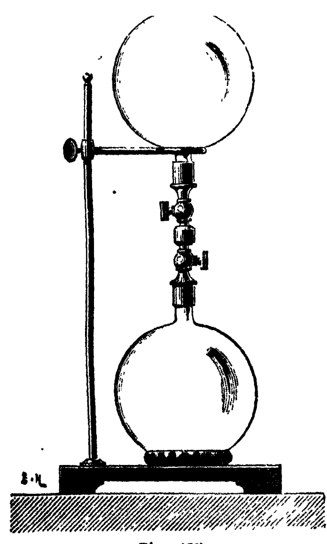
Prenons plusieurs gaz à la même température, ayant des volumes v, v', v'', avec des forces élastiques p, p', p''. Réunissons-les dans un volume V; si chacun d'eux occupait seul tout l'espace V, les forces élastiques respectives seraient x, x', x'', données, d'après la loi de Mariotte, par les équations : $vp = Vx$, $v'p' = Vx'$...

D'après la loi de Dalton, la force élastique du mélange est :

$$P = x + x' + x'' \ldots = \frac{vp}{V} + \frac{v'p'}{V} + \frac{v''p''}{V} + \ldots$$

On tire de là : $VP = vp + v'p' + \ldots = \Sigma vp$ (1).

La loi du mélange des gaz peut être vérifiée en faisant passer des masses gazeuses, de pression et de volume connus, dans une même enceinte de volume V et en mesurant la pression du mélange.


Fig. 195.

Si $p = p' = p''$ et $V = v + v' + v''$, la pression du mélange est :

$$P = \frac{p}{V}(v + v' + \ldots) = p.$$

Ce cas, sans variation de pression, a été établi par Berthollet.

Expérience de Berthollet. — Berthollet prit deux ballons égaux munis de garnitures à robinets, remplit l'un d'acide carbonique, l'autre d'hydrogène à la même pression, ferma les robinets et vissa le ballon rempli du gaz le plus léger sur le ballon du gaz le plus lourd. L'ensemble fut descendu dans les caves de l'Observatoire de Paris, où la température est invariable. Vingt-

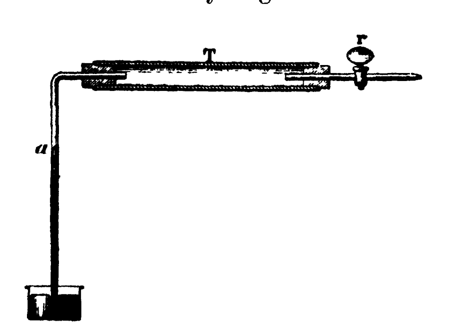
(1) Cette équation peut encore s'écrire : $V = \frac{vp}{P} + \frac{v'p'}{P} + \ldots$ d'après l'équation $Py = vp$, l'un des gaz occuperait le volume $y = \frac{vp}{P}$, s'il était porté à la pression P; le volume d'un mélange est donc égal à la somme des volumes qu'occuperait séparément chacun des gaz soumis à la pression totale du mélange.

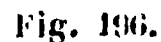
quatre heures plus tard, l'équilibre de température étant établi entre les ballons et le milieu extérieur, les robinets furent ouverts (fig. 195). Après une communication de plusieurs heures, les robinets furent fermés.

L'analyse fit voir que la proportion des deux gaz était la même dans chacun des deux ballons, donc chaque gaz occupait la capacité totale comme si elle avait été vide; en outre, la pression du mélange était égale à la pression initiale.

171. Osmose des gaz. — L'osmose des gaz est une diffusion entre gaz séparés par une cloison à pores très fins. Les *vitesses de diffusion* de différents gaz *sont en raison inverse des racines carrées de leurs densités.*

Par exemple, ayant pris un tube de terre T communiquant avec un tube vertical de verre de 1 mètre qui plonge dans le mercure, on le remplit d'hydrogène et on ferme le robinet *r*. L'hydrogène se diffuse à




Fig. 196.

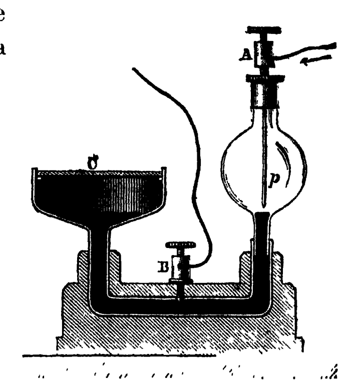


Fig. 197.

l'extérieur et le mercure est parfois soulevé jusqu'à $0^m,70$. En remplaçant la terre par du platine ou de l'acier, on n'a aucun passage d'hydrogène à la température ordinaire, mais si on chauffe les tubes au rouge vif, le mercure est fortement soulevé. On garantit les tubes de l'action des gaz du foyer en les disposant dans un tube de porcelaine.

L'osmose des gaz permet de séparer les gaz d'un mélange.

On l'utilise aussi pour avertir de la présence dans une enceinte de gaz plus diffusibles que les gaz de l'atmosphère.

Un *avertisseur* de gaz d'éclairage ou de grisou consiste en un tube en U contenant du mercure et fermé à l'une de ses branches par une plaque poreuse C. Le gaz d'éclairage traverse la cloison plus vite que l'air, augmente la pression intérieure, et fait monter le mercure; une pointe *p* ferme le circuit B*p*A d'une sonnerie (fig. 197).

DISSOLUTION DES GAZ DANS LES LIQUIDES

172. Les gaz sont inégalement solubles. L'ammoniaque et l'anhydride sulfureux sont très solubles dans l'eau, l'azote et l'oxygène sont peu solubles; la solubilité dépend de la *nature du liquide :* l'anhydride carbonique est plus soluble dans l'alcool que dans l'eau.

La masse de gaz dissous *augmente avec la pression* qu'il exerce sur le liquide. Le gaz se dégage complètement si l'on fait le vide au-dessus du liquide. Si la dissolution est portée dans un espace qui ne renferme pas le gaz dissous, le gaz s'échappe comme dans le vide.

Si l'on diminue la pression au-dessus d'une dissolution, une partie du gaz dissous se dégage; le liquide conserve la masse qui correspond à la nouvelle pression. Souvent il reste alors un excès de gaz et la solution est dite *sursaturée.* L'excès de gaz s'échappe quand on agite le liquide ou quand on y projette des corps qui présentent des aspérités. L'air condensé à la surface des aspérités constitue une atmosphère dans laquelle le gaz dissous se dégage, par bulles.

La masse dissoute *diminue quand la température s'élève* et le meilleur moyen de dégager la totalité des gaz dissous est de faire bouillir la dissolution.

Loi de la solubilité. — A une température déterminée, le volume v d'un gaz dissous, *mesuré à la pression finale du gaz restant,* est proportionnel au volume V du liquide et indépendant de la pression ; $v = cV$.

Le coefficient c s'appelle le *coefficient de solubilité.* La masse de gaz dissous occupe le volume v à la pression finale p ou un volume v_1 à la pression 76, donné par l'équation $pv = v_1 76$;

$$\text{d'où} \quad v_1 = \frac{cVp}{76}.$$

La pression finale est égale à la pression initiale si l'atmosphère gazeuse qui surmonte le liquide est indéfinie.

Masse du gaz dissous dans une enceinte limitée. — Soit V le volume du liquide, W le volume du gaz à une pression initiale P.

La masse du gaz dissous a le volume cV à la pression finale p. Après la dissolution, le gaz comprend deux parties : le gaz restant, de volume W à la pression finale p; le gaz dissous, de volume cV à la pression p.

En réunissant ces deux masses on a, d'après la loi du mélange des gaz :

$$WP = (W + cV)p.$$

Dissolution d'un mélange gazeux. — Chacun des gaz d'un mélange gazeux *se dissout dans un liquide comme s'il était seul.*

Exercice. — Calculer les volumes d'oxygène et d'azote dissous à 0° par l'unité de volume d'eau en présence de l'air, à la pression H. Coefficients de solubilité : pour l'oxygène 0,041, pour l'azote 0,020.

A la pression 0,21 H que l'oxygène exerce dans le mélange, un volume V d'eau dissout un volume d'oxygène, qui, mesuré à la pression 76 est :

$$v_1 = \frac{0,041 \, . \, 0,21 \, H}{76} V.$$

Mesuré à la même pression 76, le volume d'azote dissous est

$$v'_1 = \frac{0,020 \, . \, 0,79 \, H}{76} V; \quad \frac{v_1}{v'_1} = \frac{861}{1580}.$$

En posant en outre $v_1 + v'_1 = 100$, on trouve $v_1 = 35$, $v'_1 = 65$ pour la composition en volumes de l'air dissous ou 65 d'azote et 35 d'oxygène.

L'air dissous qui sert à la respiration des animaux et des végétaux aquatiques est donc plus riche en oxygène que l'air atmosphérique.

NAVIGATION AÉRIENNE

En navigation aérienne, le premier problème est d'assurer la ***sustentation*** ou le maintien d'un appareil au sein de l'atmosphère; le second problème est d'obtenir la ***direction*** ou le déplacement dans un sens déterminé.

Sustentation. — Pour les systèmes *plus légers que l'air* (aérostats), la sustentation est *statique*, par équilibre entre le poids de l'appareil et la poussée qui est exercée par l'air déplacé.

Pour les systèmes *plus lourds que l'air* (aéroplanes), la sustentation est *dynamique*, par des surfaces inclinées qu'une force motrice déplace ; le cerf-volant et le vol de l'oiseau en donnent l'exemple.

AÉROSTATS

173. On appelle ***aérostats*** des appareils formés d'une enveloppe contenant un gaz plus léger que l'air et pouvant s'élever dans l'atmosphère, en vertu du principe d'Archimède.

Un aérostat (fig. 198) comprend trois parties principales : 1° le *ballon*, 2° la *nacelle*, 3° le *filet* qui relie le ballon et la nacelle.

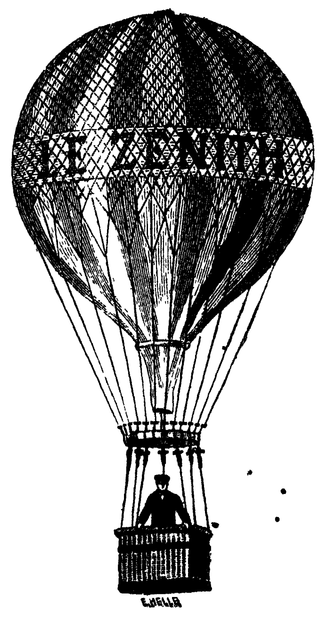


Fig. 198.

Le **ballon** est un sac sphérique de taffetas de soie, mince, résistant, recouvert de plusieurs couches de vernis imperméable. A sa partie inférieure, l'enveloppe est percée d'une ouverture circulaire, à laquelle est adaptée une *manche* cylindrique en étoffe, formant un tuyau par lequel se fait le gonflement du ballon. On remplit le ballon d'hydrogène ou de gaz d'éclairage. Au pôle supérieur de l'enveloppe est disposée une *soupape*, fermée par des ressorts, que l'aéronaute peut ouvrir de l'extérieur au moyen d'une corde qui traverse le ballon et sort par la manche.

La **nacelle** est en osier et rectangulaire. Elle porte les aéronautes et les accessoires: baromètre, thermomètre, boussole, sacs de lest, guiderope et ancre d'arrêt. La nacelle est soutenue par des cordes attachées à un **filet** qui entoure l'hémisphère supérieur du ballon et répartit la charge sur toute la surface.

Force ascensionnelle. — Tout aérostat est soumis à deux forces : 1° le *poids* P de l'enveloppe, de l'air intérieur et de la nacelle; 2° la *poussée* P′, égale au poids de l'air déplacé. La force ascensionnelle est la différence P′—P. C'est encore le poids A qui devrait être suspendu à l'aérostat pour le maintenir en équilibre dans l'air; on aurait $A + P = P'$.

Force ascensionnelle au départ. — Appelons ϖ le poids de l'enveloppe et de la nacelle, v leur volume, V le volume intérieur du ballon, a et a' les poids spécifiques de l'air extérieur et du gaz intérieur à la température ambiante et à la pression 76.

Le poids d'un volume déterminé de gaz étant proportionnel à sa pression, le poids du gaz intérieur et le poids de l'air extérieur déplacé, qui ont tous les deux le volume V et la pression H, sont $\frac{VaH}{76}$ et $\frac{Va'H}{76}$; $\frac{vaH}{76}$ est le poids de l'air déplacé par l'enveloppe et la nacelle. La force ascensionnelle a pour valeur

$$A = \frac{VaH}{76} + \frac{vaH}{76} - \frac{Va'H}{76} - \varpi. \quad (1)$$

Variations de la force ascensionnelle. — Au départ, le ballon est plein, c'est-à-dire complètement gonflé; quand il s'élève, le gaz intérieur augmente de volume, car la pression extérieure diminue. Pour que la différence des pressions intérieure et extérieure ne fasse pas éclater le ballon à une certaine hauteur, la manche de gonflement est ouverte et laisse échapper du gaz à sa partie inférieure. La différence $\frac{V(a-a')H}{76}$, partie principale de la force ascensionnelle, diminue avec H. Quand le

(1) Le poids d'un mètre cube d'air à 0° et 76 est $1^k,3$; le poids d'un mètre cube d'hydrogène est $0^k,09$; d'où, pour un mètre cube d'hydrogène une force ascensionnelle de $1^k,21$. La force ascensionnelle par mètre cube de gaz d'éclairage est $0^k,60$.

ballon a atteint sa zone d'équilibre, il ne s'élève plus, il est entraîné horizontalement par le vent. L'aéronaute, en repos relatif par rapport à l'air ambiant qui l'entraîne, n'est atteint par aucune brise, aucune poussière et ne perçoit son déplacement que par la fuite des objets terrestres.

Au moment de l'équilibre dans le sens vertical, diverses causes venant alourdir le ballon et le faire descendre, si son volume restait constant, la poussée augmenterait à mesure que le ballon descend puisque l'air extérieur devient plus dense; mais le ballon est devenu *flasque,* son volume diminue et la descente ne s'arrête plus.

Pour ne pas atterrir, on jette du *lest* en vidant des sacs de sable, ce qui diminue le poids du ballon sans modifier la poussée. Le ballon remonte jusqu'à ce qu'il soit complètement regonflé. Il se fixe alors dans une zone d'équilibre plus élevée que la première, car le poids du ballon a été réduit par la perte du lest. On atteindra ainsi progressivement des zones d'équilibre de plus en plus élevées.

Manœuvres de l'aérostat. — Un abaissement de la pression barométrique apprend que l'on s'élève, un accroissement montre que l'on descend. La *hauteur barométrique* observée permet de calculer l'altitude. Pour s'élever on jette du lest. Pour modérer l'ascension ou pour descendre, on augmente le poids du ballon *en ouvrant,* au moyen de la corde, *la soupape à ressort* de la partie supérieure du ballon. Il s'échappe du gaz et il rentre de l'air extérieur qui est plus lourd, un tirage se produisant de bas en haut, entre les deux ouvertures du ballon.

Ballonnet. — Afin de ne pas gagner des zones d'équilibre de plus en plus élevées et rester maître de choisir pour zone d'équilibre une zone de navigation ou de déplacement par le vent, on diminue la force ascensionnelle en réduisant le volume du gaz intérieur au moyen d'un ballonnet. Le ballonnet est une poche formée par une petite enveloppe cousue à la partie interne et inférieure du ballon. Cette poche communique par une manche en étoffe avec un ventilateur disposé dans la nacelle. L'air qu'on y introduit réduit le volume que le gaz léger peut occuper en se dilatant et le ballon se trouve entièrement regonflé à une altitude plus basse que s'il avait conservé toute la cavité de l'enveloppe.

Guiderope. — Le guiderope ou corde guide est une corde d'environ cent mètres, enroulée en pelote et attachée au flanc de la nacelle par une cordelette que l'on délie pour produire le déroulement. On laisse pendre le guiderope qui touche la terre. Délesté de la partie traînante du guiderope, le ballon se met en équilibre et cesse de descendre; il ne monte pas davantage, car il s'alourdirait de la partie soulevée de la corde. L'aérostat continue sa route horizontalement; le frottement de la corde sur le sol ralentit son mouvement.

Quand elle glisse à terre, la corde ne peut être saisie pour faciliter l'atterrissage. Par l'*ancre* on arrête le ballon à proximité du sol.

Parachute. — Les flancs du ballon portaient autrefois une sorte de

parapluie en étoffe appelé parachute; de son pourtour partaient des cordes qui s'attachaient à la nacelle. Quand un accident obligeait à quitter le ballon, la nacelle tombait très vite, mais le parachute s'ouvrant, la vitesse de chute prenait rapidement une vitesse limite uniforme par la résistance de l'air qui croissait avec la vitesse. Au centre de la toile du parachute, une ouverture livrait un passage régulier à l'air comprimé et préservait des secousses qu'un dégagement latéral de l'air imprime à l'appareil.

Ballons sondes. — Dès l'origine, les savants utilisèrent les aérostats pour l'étude des phénomènes atmosphériques. Les ascensions en altitude sont dangereuses à cause de la raréfaction croissante de l'air; aussi, actuellement, on explore les couches supérieures de l'atmosphère avec des *ballons sondes* non montés, de petit diamètre, gonflés d'hydrogène; ils enlèvent une nacelle qui contient des *appareils enregistreurs* (baromètres, thermomètres, hygromètres, actinomètres, réservoirs vides s'ouvrant automatiquement pour recueillir le gaz ambiant).

Les ballons sondes en étoffe sont munis d'une manche et se comportent comme les ballons ordinaires. Après avoir séjourné quelque temps dans une zone d'équilibre, ils deviennent flasques et descendent.

On emploie aussi des ballons complètement fermés, confectionnés avec une étoffe de caoutchouc. Le ballon s'élevant, la pression extérieure diminue, l'hydrogène se dilate et distend l'enveloppe, au point de la rendre 8 à 10 fois plus grande. Le ballon finit par éclater et la nacelle redescend avec une vitesse atténuée par un petit parachute qui se déploie.

Les ballons sondes ont atteint des hauteurs de plus de 20 mille mètres.

Ballons dirigeables. — Avec le lest et la soupape, l'aéronaute ne peut agir que sur la force ascensionnelle pour monter ou descendre, il ne peut lutter dans le sens horizontal contre l'entraînement du vent et faire manœuvrer le ballon dans une direction quelconque. Pour rendre les ballons dirigeables, on a imité la navigation à vapeur, et employé une force motrice qui imprime à l'aérostat une vitesse propre en prenant un point d'appui sur l'air par une hélice.

Comme les aérostats sphériques, les aérostats dirigeables ont une enveloppe imperméable au gaz qui les gonfle. Leur ballon a une forme allongée, il est relié, d'une façon rigide, à une nacelle par des cordages. La nacelle porte : 1° un ***gouvernail*** destiné à orienter l'axe longitudinal de l'aérostat; 2° un ***moteur*** très léger par rapport à sa puissance; 3° une ***hélice*** qui est le propulseur sur lequel agit le moteur. Comme la résistance que l'air oppose à l'énorme surface du ballon rend l'avancement difficile, il faut de puissants moteurs pour assurer une vitesse propre pratiquement utilisable.

AÉROPLANES

174. — Un aéroplane se compose : 1° d'un châssis en bois léger, appelé ***fuselage*** qui forme le corps de l'appareil ; 2° d'un ***gouvernail*** ; 3° de deux grandes toiles (d'environ 2^m de longueur et 10 à 12^m de largeur ou d'envergure), tendues sur une armature en bois fixée au fuselage et formant les ***ailes de sustentation*** ; 4° d'un ***moteur*** ou propulseur, disposé en avant du fuselage et actionnant une hélice. L'aviateur a son siège près du moteur.

On appelle *monoplan* un aéroplane qui n'a qu'une paire d'ailes disposées côte à côte, comme celles d'un oiseau ; un ***biplan*** possède deux séries d'ailes superposées.

Pour l'envol, l'aéroplane est monté sur trois roues : deux à l'avant : une à l'arrière, moins élevée ; il repose d'abord à terre. Le moteur étant mis en marche, l'hélice tourne, et la force motrice fait rouler l'aéroplane sur le sol à la façon d'une automobile. *La pression de l'air contre la surface plane oblique des ailes de sustentation* ajoute un mouvement vertical au mouvement horizontal ; après un parcours de 40 à 50 mètres, la sustentation surpasse le poids et l'appareil s'élève graduellement.

Quand le pilote arrête le moteur, l'appareil descend par l'action de son poids, en pente douce, en planant, à la façon d'un cerf-volant. Le planement conduit à l'atterrissage.

Mécanisme de la sustentation dynamique (fig. 199). — Dans le déplacement d'un plan incliné dans l'air, le propulseur joue le rôle de la corde d'un cerf-volant (1). La résistance R, de l'air coupé par le plan MN qui se déplace est normale au plan, proportionnelle à la surface S et au carré de la vitesse a, elle dépend de l'angle φ du plan avec la direction du déplacement (*angle d'attaque*). Pour un *petit angle d'attaque*, ce qui est le cas usuel, $R = KSa^2 \sin \varphi$. Cette résistance est appliquée en un point O, appelé centre de pression, situé au-dessus du centre de gravité (2).

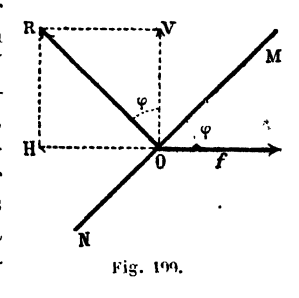


Fig. 199.

(1) Pour enlever *un cerf-volant*, on l'entraîne vivement en le tirant avec une corde ; il s'élève rapidement, surtout si le vent souffle. Une pression de bas en haut, exercée par l'air qui s'oppose à la translation, détermine une sustentation et fait équilibre à la résultante du poids de l'appareil et de la traction de la corde.

(2) La résultante des pressions des flux d'air parallèles qui frappent le plan serait appliquée au centre de gravité si tous les flux avaient le même effet, mais les flux inférieurs perdent en efficacité par leur croisement avec des flux supérieurs refléchis sur le plan. La poussée R fait équilibre à la résultante de la force f du propulseur et du poids de l'appareil.

La composante verticale de la résistance $V = R \cos\varphi$, diffère peu de R; dans l'équilibre, elle est égale au poids P de l'appareil. La composante horizontale, $H = R \sin\varphi$, est égale dans l'équilibre à la force horizontale f du propulseur, dans un déplacement horizontal [1].

$$P = R\cos\varphi = KSa^2 \sin\varphi \cos\varphi \text{ ou sensiblement } P = KSa^2\varphi.$$

Pour un aéroplane de poids P, de surface portante S et d'angle d'attaque φ, la seule valeur de a qui corresponde au déplacement horizontal est $a = \sqrt{\frac{P}{KS\varphi}}$. Quand la vitesse a augmente par un plus grand travail du propulseur, la poussée R et sa composante verticale V augmentent, l'appareil monte; l'appareil descend au contraire lorsque le travail du moteur diminue. Si le poids augmente, il faut renforcer l'action du moteur puisque a doit être proportionnel à $\sqrt{P}$, ou diminuer l'angle d'attaque.

Le travail dépensé en une seconde par le moteur ou *la puissance du moteur* est $aR \sin\varphi = KSa^3 \sin^2\varphi$. La puissance devant croître *comme le cube de la vitesse*, il faut un moteur huit fois plus fort pour doubler la vitesse. Le coefficient K se détermine par des essais.

Une *aile* ou surface portante d'aéroplane est un rectangle. Son *envergure*, côté transversal perpendiculaire à la marche, est notablement supérieure au côté longitudinal, qui est parallèle à la marche [2].

Propulsion. — Dans toute navigation par dirigeable ou par aéroplane, le travail de rotation fourni par le moteur à son arbre est converti en travail de translation par une ***hélice*** qui est formée de deux palettes inclinées fixées sur l'arbre du moteur. L'air sert de point d'appui à l'hélice qui s'y enfonce comme une vis dans un écrou.

La résistance que l'air oppose à l'avancement des appareils aériens est diminuée en leur donnant la forme *en fuseau* d'un projectile allongé ou mieux d'un poisson dont le corps, pointu aux deux extrémités, est plus gros du côté de la tête [3].

DIRECTION

175. Si le mode de sustentation diffère suivant qu'il s'agit d'un plus léger ou d'un plus lourd que l'air, les conditions de la direction sont les mêmes dans les deux cas.

Un appareil aérien, dont la position est en O à un instant donné, se

(1) Le pilote, entraîné à la fois par l'air ambiant et par la vitesse propre de son navire aérien, reçoit de l'avant à l'arrière un courant d'air d'une vitesse égale et contraire à sa vitesse propre. Avec une vitesse propre de même sens que la vitesse d'entraînement par l'air ambiant, un navire aérien est certain d'atteindre un système qui est simplement entraîné par l'air.

(2) Les oiseaux au vol puissant ont une grande envergure.

(3) La forme effilée de l'arrière facilite l'écoulement de l'air.

déplace par sa vitesse propre OD; il est en même temps entraîné par la vitesse du vent OC. Sa vitesse définitive OM, par rapport à un point immobile du sol, est la résultante géométrique de ses deux vitesses simultanées, elle varie avec l'angle DOC (fig. 200).

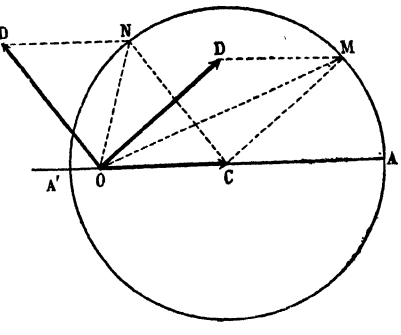


Fig. 200.

La *vitesse du vent*, OC, ayant une direction invariable, une circonférence de centre C, de rayon CM = OD, est le lieu des points abordables, après l'unité de temps, pour la vitesse propre OD.

1° ***Si la vitesse propre*** **OD** ***est supérieure à la vitesse du vent*** OC, le point de départ O est à l'intérieur de la circonférence (fig. 200). Le pilote peut manœuvrer son gouvernail de façon à diriger le ballon vers tout point de l'horizon et y aborder après un certain temps. La vitesse résultante est maximum dans le sens du vent et égale à OA : elle est minimum en sens contraire et égale à OA'. L'angle des vitesses résultantes avec OC varie de 0 à 2π.

2 ***Si la vitesse propre maximum*** OE ***est inférieure à la vitesse*** OC ***du vent***, la dirigeabilité n'est plus complète, la circonférence abordable pour cette vitesse, après une seconde, laisse le point de départ O en dehors d'elle (fig. 200 *bis*). L'angle FOF' des tangentes OF et OF' à la circonférence de centre C et de rayon OE, est un angle limite dont on ne peut sortir; plus la vitesse diminue, plus cet angle est fermé. L'angle FOF' s'appelle le *secteur abordable*.

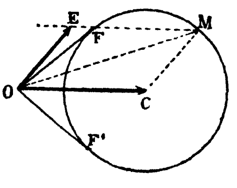


Fig. 200 *bis*.

Pour un dirigeable, la vitesse propre atteint 20 mètres par seconde; pour un aéroplane elle peut dépasser 40 mètres.

MACHINE PNEUMATIQUE

Une machine pneumatique est une pompe qui *sert à raréfier un gaz contenu dans un espace clos.*

176. Description et fonctionnement (fig. 201). — Une machine pneumatique se compose d'un cylindre creux ou *corps de pompe* C, percé à sa base d'un orifice, fermé par une soupape S, qui donne accès par un tuyau au récipient R contenant le gaz à extraire. Dans le corps de pompe se meut un piston creux fermé par une soupape S' qui s'ouvre comme S, de bas en haut. Le piston P étant abaissé, les soupapes S et S' sont fermées.

On soulève le piston. Il laisse au-dessous de lui, dans le corps de pompe, un espace vide d'air; par sa force *élastique*, le gaz du récipient soulève la soupape S et, par son *expansibilité*, il entre en partie dans le corps de pompe; la soupape S′ reste fermée par la pression atmosphérique.

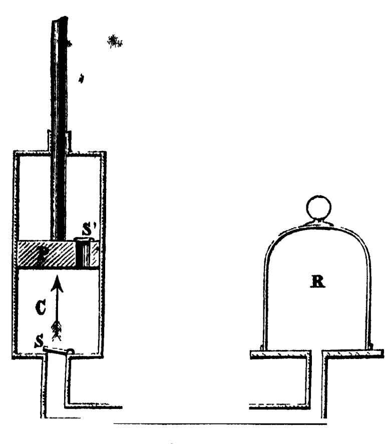


Fig. 201.

Quand le piston est arrivé au bout de sa course, la force élastique du gaz cesse de déoroître dans le corps de pompe et la soupape S, également pressée sur ses deux faces, retombe par son poids.

On abaisse le piston. La soupape S, fermée, s'oppose au retour dans le récipient du gaz du corps de pompe; ce gaz, isolé du récipient, est comprimé puisque son volume diminue; quand sa force élastique dépasse la pression atmosphérique qui agit au-dessus du piston, la soupape S′ se soulève. Tout le gaz du corps de pompe s'est échappé quand le piston touche la base du corps de pompe.

Répétition de la manœuvre. — On est revenu aux conditions du début, mais la force élastique a diminué dans le récipient, puisque le gaz s'est partagé entre le récipient et le corps de pompe.

On lève de nouveau le piston, le gaz du récipient se partage encore entre le récipient et le corps de pompe; le gaz du corps de pompe, isolé, quand le piston s'abaisse, s'échappe au dehors.

Chaque course descendante du piston extrait un volume de gaz, de pression décroissante, égal au volume du corps de pompe.

177. Force élastique dans le récipient après *n* coups de piston. — Désignons par R le volume du récipient et du tuyau qui va au corps de pompe, par C la capacité du corps de pompe.

Au début, le piston touchant le fond du corps de pompe, la masse gazeuse du récipient a un volume R et une force élastique H; le piston étant soulevé, cette masse occupe R + C. D'après la loi de Mariotte, sa force élastique nouvelle H_1 satisfait à l'équation :

$$RH = (R + C) H_1 \cdot \text{ d'où } H_1 = \frac{R}{R + C} H.$$

Le gaz du corps de pompe est expulsé dans l'atmosphère pendant

la descente du piston. Quand on soulève de nouveau le piston, le gaz resté dans le récipient, à la pression H_1, occupe R + C; sa force élastique après deux coups de piston est H_2,

$$H_2 = \frac{R}{R+C} H_1 = \left(\frac{R}{R+C}\right)^2 H.$$

Après n coups de piston :

$$H_n = \frac{R}{R+C} H_{n-1} = \left(\frac{R}{R+C}\right)^n H.$$

Le nombre des coups de piston croissant en progression arithmétique, les pressions dans le récipient *décroissent en progression géométrique*. Avec une machine parfaite $\left(\frac{R}{R+C}\right)^n$ H tend vers zéro si n croît indéfiniment, $\frac{R}{R+C}$ étant inférieur à l'unité.

La densité d'un gaz étant proportionnelle à sa pression,

$$\frac{D_n}{D} = \frac{H_n}{H}, \quad D_n = D\left(\frac{R}{R+C}\right)^n.$$

D est la densité initiale, D_n la densité après n coups de piston.

178. Emploi de deux corps de pompe (fig. 202). — A mesure que le gaz est raréfié dans le récipient, sa pression sur la face inférieure du piston décroît, tandis que la pression de l'atmosphère sur la face supérieure reste constante. L'effort de l'opérateur, *égal à la différence des pressions sur les deux faces, va donc en augmentant* (1).

Il est avantageux d'associer deux corps de pompe; les deux corps de pompe C et C′, en cristal, contiennent chacun un piston et communiquent, par leur partie inférieure, avec un seul et même con-

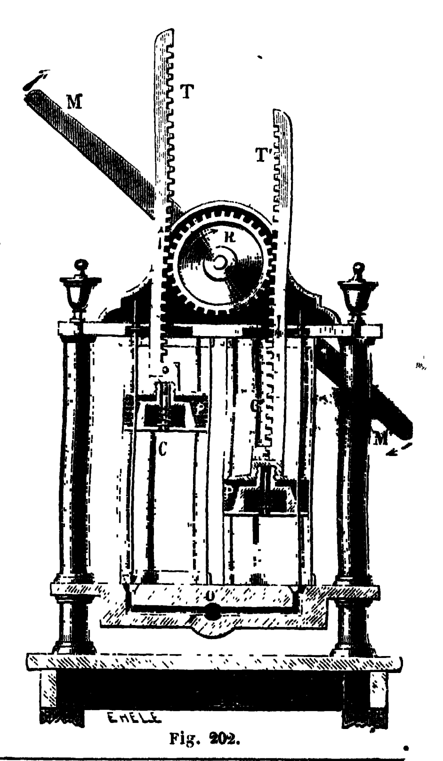


Fig. 202.

(1) *Calcul de l'effort pour une surface de piston de un décimètre carré*, lorsque la force élastique dans le récipient est abaissée à 5 millimètres de mercure.

Pression sur la face supérieure du piston : 100.76.13,59.981 = 100.1033.981

Pression sur la face inférieure : 100.0,5.13,59.981 = 100.6,79.981

L'effort, égal à la différence, est voisin de 100 kilogrammes. Le travail est le produit de l'effort par la course du piston.

L'effort est réduit avec la section du corps de pompe ; mais la diminution de la capacité exige un plus grand nombre de coups de piston pour une même raréfaction.

duit O qui va au récipient. Les tiges T et T' des deux pistons sont des crémaillères et engrènent avec une roue dentée R qui reçoit un mouvement alternatif d'une manivelle à deux poignées M et M'. L'une des extrémités du levier s'élève quand l'autre s'abaisse et l'un des pistons monte quand l'autre descend. Les pressions exercées par l'atmosphère sur les faces supérieures des deux pistons se font équilibre puisque, par l'intermédiaire des crémaillères, l'une tend à faire tourner la roue dans

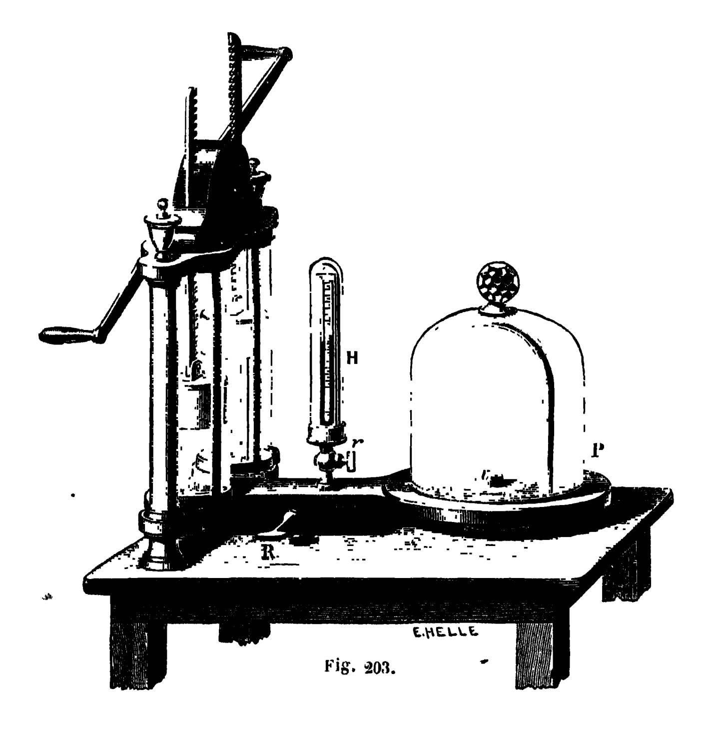


Fig. 203.

un sens et l'autre en sens inverse. L'effort est alors égal *à la différence des pressions sur les faces inférieures des pistons.*

La manœuvre de la machine à deux corps de pompe (fig. 203) reste pénible, car, outre les différences de pression, on doit vaincre les frottements des pistons. *Le vide se fait deux fois plus vite* qu'avec un seul corps de pompe, car à chacun des mouvements, l'air du récipient passe dans un corps de pompe.

179. Piston et soupape. — Le piston est formé d'un noyau en cuivre D offrant une base élargie sur laquelle sont empilées des rondelles de cuir graissé C, que l'on serre avec un écrou E, pour établir un bon contact du piston et du corps de pompe (fig. 204).

Le noyau métallique du piston est traversé entièrement par un canal dont l'extrémité inférieure est fermée par une soupape que maintient un ressort en hélice *h*. Quand le piston descend, la force élastique de l'air comprimé surmonte la faible résistance du ressort et soulève la soupape.

A travers le piston, une tige t passe à frottement dur, elle porte inférieurement une soupape I en forme de tronc de cône, reçue dans l'orifice conique du tuyau qui mène au récipient. Le piston, en se soulevant, entraîne avec lui la tige; mais aussitôt que la soupape abandonne l'ouverture du conduit, la tige est arrêtée par un renflement K de sa partie supérieure; elle reste alors immobile, et le piston continue à monter en glissant sur elle. A la descente du piston, la tige le suit pendant un instant et appuie la soupape dans l'orifice; le piston continue à descendre en glissant le long de la tige. La communication *automatique* du récipient et du corps de pompe est ainsi assurée, alors que la force élastique dans le récipient ne soulève plus d'elle-même une soupape.

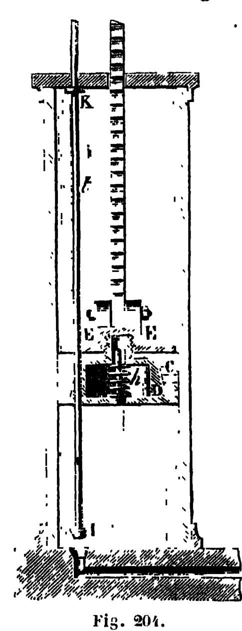


Fig. 204.

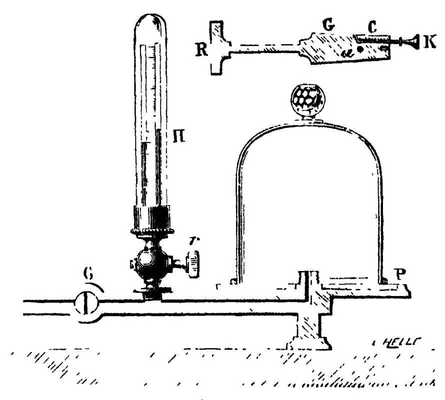


Fig. 205.

Manomètre. — On apprécie le degré de vide à l'aide d'un petit baromètre à siphon dont la branche fermée n'a que 30^{cm} de hauteur. Ce baromètre tronqué est logé dans une éprouvette à parois épaisses H qui communique avec le récipient par un robinet r (fig. 203 et 205). Le mercure est appliqué contre le sommet de la branche fermée, tant que la pression dans le récipient dépasse 30^{cm} de mercure; au-dessous de 30^{cm}, le mercure descend. La pression est mesurée par la différence des niveaux dans les deux branches. La limite d'effet est atteinte lorsque les niveaux deviennent stationnaires, malgré le fonctionnement.

Platine. — La platine est un plateau circulaire en verre dépoli P, parfaitement dressé, au centre duquel s'ouvre le canal d'aspiration. On pose sur ce disque la cloche sous laquelle on veut faire le vide, après avoir suifé ses bords pour obtenir une fermeture hermétique. Quand le vide est fait, la pression atmosphérique maintient la cloche fortement appliquée sur la platine. La tubulure du centre de la platine est terminée par un pas de vis v sur lequel on peut visser divers récipients (fig. 203).

Clef. — Un robinet ou *clef* R, disposé en G sur le conduit d'aspiration (fig. 205), entre les corps de pompe et le manomètre, permet : 1° de mettre les corps de pompe en communication avec le récipient pour faire le vide;

2° d'intercepter cette communication pour conserver le vide et rendre l'air dans les corps de pompe; 3° de rendre l'air dans le récipient quand les expériences sont terminées.

180. Limite du vide. — Théoriquement, la force élastique, après n coups de piston, n'est jamais nulle, si grand que soit n. Diverses défectuosités de la construction limitent d'ailleurs le degré de vide. En particulier, le piston arrivé au bas de sa course, n'est pas en contact intime avec le fond du corps de pompe; de petits intervalles forment un *espace nuisible* qui limite la raréfaction.

Influence de l'espace nuisible. — Au bas de la course du piston, l'espace nuisible, de volume u, renferme du gaz à la pression extérieure H: car, à la descente, la soupape du piston s'est fermée par son poids lorsque la pression dans l'espace nuisible n'a plus dépassé la pression extérieure. Quand le piston remonte, le gaz de l'espace nuisible occupe graduellement le volume C du corps de pompe et sa pression finale f, est donnée, d'après la loi de Mariotte, par :

$$\frac{f}{H} = \frac{u}{C}, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{u}{C} H.$$

Dès lors, il ne passe de gaz du récipient au corps de pompe que si sa force élastique est supérieure à $\frac{uH}{C}$ (1).

POMPE A MERCURE

181. La pompe à mercure, en utilisant le vide barométrique, pousse très loin la raréfaction d'un gaz.

Description (fig. 206). — Elle se compose d'un tube vertical fixe T servant de tube barométrique, évasé à sa partie supérieure en un ballon A de $\frac{1}{2}$ litre de capacité qui forme la chambre barométrique et communique par un tube supérieur t avec le récipient que l'on veut vider. A l'extrémité inférieure du tube T est fixé un tube en caoutchouc non vulcanisé qui se continue par un réservoir A′ formant la cuvette du baromètre et pouvant être élevé au-dessus du ballon A.

(1) La limite du vide serait reculée, si le gaz de l'espace nuisible, au bas de la course du piston, n'exerçait qu'une pression $H' < H$, la pression finale f' étant donnée par l'équation $uH' = f'C$; or en raréfiant le gaz de l'espace nuisible avec une deuxième machine pneumatique, on a

$$H' = \frac{uH}{C}, \text{ et } f' = \frac{u^2}{C^2} H.$$

En associant les deux corps de pompe *en série* au lieu de les associer *parallèlement*, comme dans le fonctionnement ordinaire, Babinet a fait servir l'un des corps de pompe à raréfier le gaz de l'espace nuisible de l'autre; celui-ci vide seul le récipient.

D'une autre façon, en faisant le vide au-dessus du piston, la pression $\frac{uH}{C}$ remplacerait H pour le gaz restant, la pression nuisible se réduirait à $\frac{u^2}{C^2}$ H, d'après $f_1C = u\frac{uH}{C}$.

En r, à la partie supérieure du baromètre, se trouve un *robinet à*

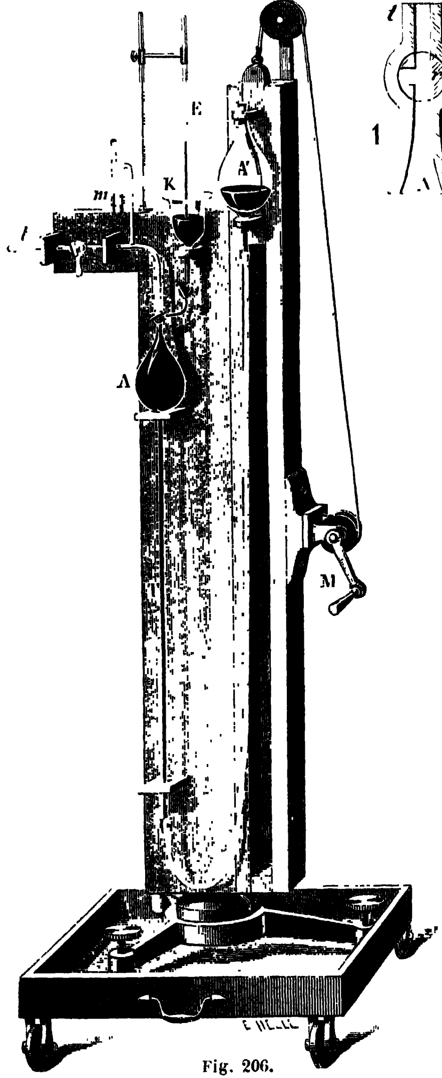


Fig. 206.

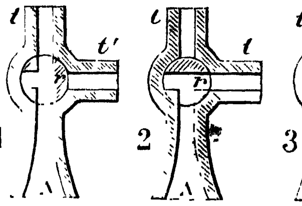


Fig. 207.

trois voies, d'où partent deux tubes : 1° le tube t qui mène au récipient et présente sur son trajet un manomètre m, puis un appareil desséchant; 2° un tube latéral t' muni d'un robinet ordinaire r' et terminé par un entonnoir K plein de mercure.

Le robinet r permet d'établir la communication de la chambre barométrique, soit avec le récipient (position 1), soit avec le tube latéral t' (position 2) (fig. 207).

Manœuvre de la pompe. — On chasse d'abord l'air qui se trouve dans la chambre barométrique. A cet effet, le robinet étant placé dans la position 2, on soulève la cuvette A', de façon à l'amener à un niveau supérieur à celui du robinet r'.

En vertu de l'équilibre dans des vases communiquants, le mercure monte dans le tube T, remplit la chambre barométrique et refoule l'air; l'air s'arrête en r' qui est fermé. En ouvrant doucement r', l'air s'échappe à travers le mercure de l'entonnoir K et l'appareil se remplit de mercure jusqu'en r'. Le mercure de la cuvette A' communique avec celui de l'entonnoir K, l'air du ballon A a disparu. On ferme alors r' et on fait descendre la cuvette A' à la partie inférieure de l'appareil; le

mercure descend dans le tube T et laisse le vide barométrique dans la partie supérieure et dans le renflement A. Si l'on donne alors au robinet *r* la position 1, une partie du gaz du récipient pénètre en A en traversant l'appareil desséchant qui maintient sec le mercure de la pompe; le mercure est déprimé dans le baromètre.

Si l'on met le robinet *r* dans la position 2 et qu'on soulève A', le gaz extrait du récipient et logé dans la chambre barométrique est comprimé, puis expulsé quand on ouvre *r'*. Il peut être recueilli dans une éprouvette E renversée sur le mercure de l'entonnoir K.

Degré du vide obtenu. — Dans une pompe à mercure, le piston est remplacé par une masse de mercure qui se déplace et *il n'y a pas d'espace nuisible*. On fait passer, à chaque descente de la cuvette, une certaine quantité du gaz du récipient dans la chambre barométrique et on arrive à faire un vide presque parfait. Au manomètre *m*, la différence entre les deux niveaux est inappréciable.

La manœuvre étant longue, les grands espaces se vident d'abord avec une machine ordinaire; on termine avec la pompe à mercure (1).

TROMPES

Les trompes sont des appareils à fonctionnement continu qui produisent le vide par l'écoulement d'un liquide.

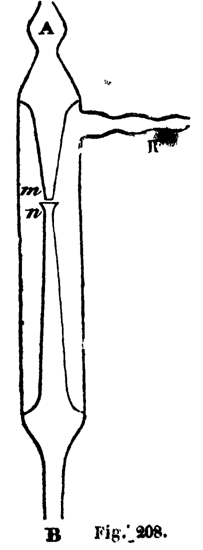


Fig. 208.

182. Trompe à eau. — *Principe de l'appareil.* — Quand la section d'un liquide qui s'écoule *se rétrécit* sur son trajet, il se produit à la veine contractée un accroissement de vitesse et une *aspiration* du gaz ambiant qui est mécaniquement entraîné avec le liquide.

Description. — La trompe à eau se compose d'un double ajutage conique offrant deux sommets opposés très rapprochés (fig. 208). Par le premier ajutage *m* arrive l'eau d'une conduite A sous une pression de plusieurs mètres d'eau, elle franchit l'espace compris entre les deux cônes et gagne le tuyau de descente B par le 2e ajutage *n*. Cet ajutage, légèrement évasé à sa partie supérieure, offre un peu plus loin un élargissement qui diminue la vitesse du liquide dans le tube de

(1) Il n'y a ici que des robinets de verre; ces robinets, pour fermer hermétiquement, n'ont besoin que d'être légèrement graissés. On construit actuellement des pompes à mercure sans robinets dans lesquelles la raréfaction peut être poussée encore plus loin.

décharge B. La section de la veine *étant rétrécie* entre m et n, le gaz environnant est aspiré et entraîné.

Autour des deux ajutages est soudée une chambre de raréfaction qu'un tuyau R relie au récipient où l'on fait le vide. Le degré de vide ne peut dépasser la tension maximum de la vapeur d'eau (17 millim. de mercure environ à 20°) (1).

Injecteur. — Un injecteur est une *trompe à vapeur;* il fonctionne par une aspiration de l'eau due à un jet de vapeur qui s'écoule par un ajutage convergent. La vapeur est introduite par un tuyau V, ou par un orifice conique dont on règle l'ouverture à la main par une vis à pointeau *a*. Elle aspire par le tuyau H l'eau d'un réservoir d'alimentation. Mélangée à la vapeur qu'elle condense, l'eau aspirée pénètre dans un second ajutage convergent, puis dans un ajutage divergent *d* où sa vitesse diminue (fig. 371).

183. Trompe à mercure. — Dans la trompe à mercure, le gaz est entraîné par un écoulement de mercure.

Description (fig. 209). — Un filet de mercure, purgé d'air, tombe goutte à goutte à l'extrémité d'un tube *l*, au centre d'une ampoule *a* qui communique avec un récipient à vider V. En s'engageant dans un long tube étroit B, une goutte est suivie par du gaz, la goutte suivante pousse ce gaz comme le ferait un piston. Les gouttes emprisonnent ainsi de petits volumes gazeux qui sont entraînés.

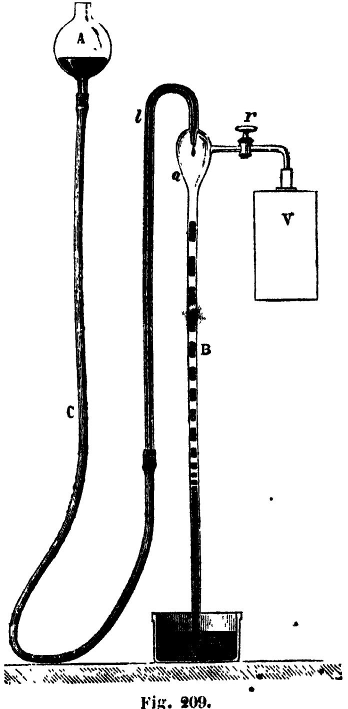


Fig. 209.

La partie inférieure du tube droit B plonge dans une cuvette à mercure par laquelle s'échappe le gaz entraîné. Le tube B ayant une hauteur supérieure à la colonne barométrique, le mercure n'atteint pas l'ampoule à la fin de l'opération.

L'écoulement du mercure est réglé par la hauteur de chute, en éle-

(1) *Trompe soufflante.* — Si le gaz aspiré et entraîné par l'eau entre m et n est recueilli dans un réservoir clos, il s'y accumule et prend une force élastique croissante. Un tuyau muni d'un robinet permet d'utiliser le gaz comprimé.

vant le réservoir A. La trompe à mercure pousse à sa dernière limite un vide obtenu préalablement avec une autre machine.

La trompe à mercure vide les lampes à incandescence et les tubes de Crookes. Un manomètre fait connaître les premiers degrés du vide, une jauge spéciale permet d'apprécier les pressions du résidu gazeux.

Fig. 210.

Mesure d'une très faible force élastique. — La *jauge* employée (fig. 210) consiste en une ampoule B surmontée d'un tube *i*, *très fin*, gradué en volumes égaux. Chaque division du tube est une fraction extrêmement petite et connue, généralement 0,001, de la capacité totale W de l'ampoule B et du tube. A sa partie inférieure, l'ampoule communique avec le récipient que l'on vide par un conduit *t* muni d'un robinet *r*.

En fermant le robinet *r*, on isole dans l'ampoule B le gaz qu'elle contient sous la pression *x* (par exemple, un millième d'atmosphère) à laquelle on est parvenu. En soulevant alors le réservoir, le volume primitif W est réduit au volume *v* lu sur le tube *i*.

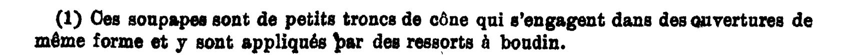
Si les niveaux du mercure ont été amenés sur un même plan horizontal dans le tube *i* et le réservoir A', le gaz de la jauge a été comprimé jusqu'à la pression atmosphérique. Lorsque le volume *v* n'est plus que la millième partie du volume W, la pression *x* est d'un millionième d'atmosphère.

MACHINE DE COMPRESSION

Une machine de compression *sert à comprimer un gaz dans un récipient*. Une machine pneumatique dont le jeu des soupapes serait renversé fonctionnerait comme machine de compression (fig. 211).

184. Pompe de compression. — Sous sa forme habituelle, la *pompe de compression*, ou pompe à main, se compose d'un corps de pompe, long et étroit, dans lequel se meut un piston plein P. A la base du corps de pompe, deux tubulures offrent suivant leur axe deux soupapes de sens contraires (1). La soupape d'*aspiration a* s'ouvre de

Fig. 211.



(1) Ces soupapes sont de petits troncs de cône qui s'engagent dans des ouvertures de même forme et y sont appliqués par des ressorts à boudin.

l'extérieur vers l'intérieur, la soupape de *refoulement* r s'ouvre de l'intérieur vers le récipient (fig. 212).

Le piston étant au bas de sa course, *soulevons-le;* le vide se fait dans le corps de pompe, la soupape r reste fermée par la pression de l'air du récipient, l'air extérieur ouvre la soupape a et remplit le corps de pompe.

Le piston étant au haut de sa course, *abaissons-le;* l'air du corps de pompe, comprimé, maintient fermée la soupape a; sa pression devient assez forte pour ouvrir r et entrer dans le récipient.

Soulevé de nouveau, le piston se remplit d'air à la pression extérieure et, à la descente, cet air est refoulé dans le récipient.

L'effort de l'opérateur va en croissant, par la résistance que l'air condensé dans le récipient oppose à l'ouverture de la soupape r.

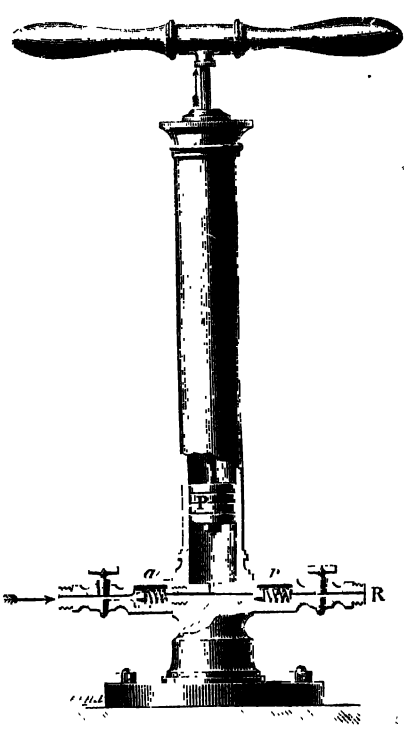


Fig. 212.

Force élastique dans le récipient après n coups de piston. — Désignons par R le volume du récipient, par C la capacité du corps de pompe; le piston étant au haut de sa course, l'air du corps de pompe a un volume C à la pression atmosphérique H. Refoulé dans le récipient, par la descente du piston, cet air a pris un volume R et une force élastique f donnée par l'équation :

$$CH = Rf, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{C}{R} H.$$

Le gaz introduit dans le récipient ajoute sa pression f à la pression initiale H_0 (loi du mélange des gaz). La pression totale est :

$$H_1 = H_0 + f = H_0 + \frac{C}{R} H.$$

Un second coup de piston fait pénétrer dans le récipient la même quantité d'air que le premier : $H_2 = H_1 + f = H_0 + 2f$.

Après n coups de piston, $H_n = H_0 + nf = H_0 + n \frac{C}{R} H.$

La pression dans le récipient augmente donc en progression arithmétique; on la mesure avec un manomètre métallique.

Limite de la compression par l'espace nuisible. — Le piston ne s'appliquant jamais exactement contre le fond du corps de pompe, on ne peut dépasser la pression du gaz réduit au volume de l'*espace nuisible*.

La force élastique de l'air du corps de pompe est égale à H au haut de la course du piston; réduit au volume u de l'espace nuisible, cet air atteint une force élastique φ donnée par l'équation :

$$CH = u\varphi, \quad \text{d'où } \varphi = \frac{C}{u} H.$$

Lorsque cette force élastique est atteinte, la soupape r ne s'ouvre plus. Si l'espace nuisible est la vingtième partie du corps de pompe, la pression dans le réservoir ne dépasse pas 20 atmosphères.

Cette pompe peut aussi être employée à faire le vide; dans ce cas, a communique avec le récipient et r avec l'atmosphère; la manœuvre est pénible puisqu'il n'y a qu'un corps de pompe; aussi diminue-t-on l'effort en ne donnant au piston qu'une petite section.

Pompe de bicyclette. — La pompe de bicyclette (fig. 213) est une *pompe à main* dont ***le corps de pompe B est mobile***. Le piston est une rondelle de cuir C, en *forme de cloche*, à bords repliés sur les parois du corps de pompe. La cloche en cuir est fixée à une tige creuse T qui porte à son extrémité un pas de vis sur lequel on raccorde un tube de caoutchouc qui s'ajuste sur le pneumatique de la bicyclette. *Quand on tire, vers le bas, le corps de pompe* (fig. 213_1), l'air extérieur entre par des orifices a de la base du corps de pompe, pénètre entre les bords de la cloche et les parois du corps de pompe, et occupe le vide produit entre le fond du corps de pompe et le cuir. *Quand on repousse, vers le haut, le corps de pompe* (fig. 213_2), l'air comprimé établit une *fermeture hermétique* en appuyant fortement les bords du cuir contre les parois du corps de pompe et n'a d'autre issue qu'un orifice o par lequel il entre dans la tige creuse, puis dans le pneumatique. Il pénètre dans le pneumatique en forçant une soupape conique qui permet l'entrée de l'air comprimé, mais empêche le retour en sens inverse, comme la soupape r de la pompe de compression (fig. 212).

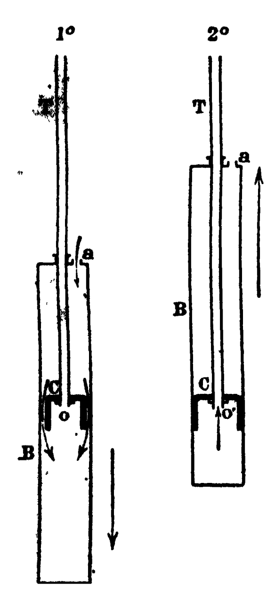


Fig. 213.

185. Applications de l'air raréfié et de l'air comprimé. — La *raréfaction de l'air* est appliquée pour s'assurer que des tuyaux

de conduite d'eau ou de gaz ne présentent pas de fuites; on voit si l'on peut y faire le vide. Citons encore : l'*évaporation dans le vide* pour les jus sucrés, les jus de viande; la *filtration* par le vide ; la *ventilation* par aspiration dans les ateliers et les théâtres; le *nettoyage par le vide* en aspirant la poussière des tentures et des tapis.

L'***air comprimé*** est fréquemment utilisé; nous citerons : 1° la distribution de l'heure dans toute une ville par les *horloges pneumatiques :* un flux d'air, partant toutes les minutes d'un récipient à air comprimé à faible pression et parcourant une canalisation, fait avancer d'une division l'aiguille du cadran de chacune des horloges de quartier; 2° le transport des dépêches par le *télégraphe pneumatique :* les dépêches manuscrites sont enfermées dans un piston creux cylindrique que l'on fait circuler dans un tube en fonte en refoulant derrière lui de l'air comprimé; 3° la distribution de l'air comprimé comme *force motrice* pour mettre en action de petits moteurs; 4° *machines soufflantes* pour forges et hauts fourneaux, pour la ventilation des tunnels et des salles de spectacles; 5° le *gonflement* par air comprimé des *pneumatiques* ou tubes de caoutchouc creux fixés aux roues des bicyclettes ou des automobiles pour supprimer les chocs sur le sol; 6° l'arrêt des trains par le *frein Westinghouse :* de l'air comprimé provenant d'une machine de compression mise en mouvement par la locomotive, est lancé à un moment donné, par une manœuvre du mécanicien, sur des pistons qui commandent les freins des wagons; 7° le fonctionnement des *machines perforatrices* employées pour le *percement des tunnels* dans des galeries souterraines où l'emploi des machines à vapeur rendrait l'air irrespirable; 8° la *traction* de tramways; 9° les *cloches à plongeur,* les *scaphandres* pour les travaux effectués sous l'eau; les caissons employés dans la construction des piles de ponts sont de grands cylindres métalliques ouverts à leur partie inférieure, dans lesquels on refoule de l'air comprimé pour chasser l'eau.

SIPHON

186. Un *siphon* est un tube recourbé à deux branches inégales *qui sert à transvaser les liquides,* par écoulement continu.

Fonctionnement. — Pour transvaser un liquide d'un vase V dans un vase V′ à niveau inférieur, on remplit de liquide le siphon recourbé AED et, les deux extrémités étant bouchées, on retourne le tube en plongeant *la courte branche dans le vase où le niveau*

est le plus élevé. Si l'on débouche les deux extrémités, le liquide s'écoule du vase V au vase V′ à travers le siphon (fig. 214).

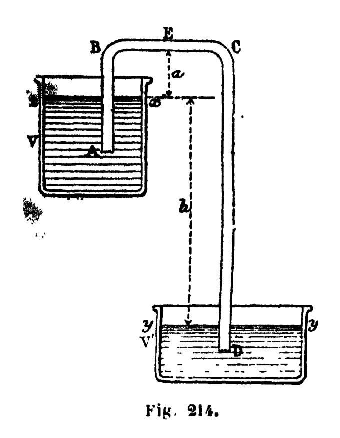


Fig. 214.

Explication. — Supposons que, dans ce tube recourbé dont les deux branches ont séparément une hauteur inférieure à la pression atmosphérique H (1033^{cm} pour l'eau, 76^{cm} pour le mercure), une cloison transversale E intercepte la communication en un point de la partie horizontale. Les deux parties ABE, DCE étant comme précédemment remplies séparément, le liquide restera suspendu de chaque côté par la pression atmosphérique au lieu de tomber par son poids; la pression, de gauche à droite sur la cloison E, sera H — a, elle est exercée sur le sommet d'un baromètre tronqué de hauteur a; la pression, de droite à gauche sur E, sera H — $(a + h)$. La différence est dirigée de gauche à droite; elle est h, mesurée en hauteur de liquide (1).

Si l'on vient à percer la cloison, l'écoulement a lieu de gauche à droite par la différence de pression, la tranche E est remplacée par une autre, et le liquide du vase V passe en V′. La vitesse d'écoulement diminue avec la différence de hauteur h.

Pour qu'un siphon puisse fonctionner, il faut : 1° que le niveau soit plus élevé dans le vase V que dans le vase V′; 2° que la pression atmosphérique qui s'exerce en xx' maintienne le siphon plein ou que *la distance verticale du point le plus haut du siphon à la surface libre du liquide à transvaser soit inférieure à la pression atmosphérique* (mesurée avec le liquide) (2).

Amorcement du siphon. — Pour remplir un siphon, ou l'*amorcer*, on plonge la courte branche dans le liquide à transvaser et on aspire à l'autre extrémité. La pression atmosphérique pousse le liquide dans le tube et l'écoulement a lieu. Si le liquide est corrosif, on plonge la courte branche dans le liquide et on bouche la longue branche pendant qu'on aspire par un tube latéral (fig. 215).

(1) Si les deux branches ont une hauteur supérieure à H, la colonne liquide se sépare au sommet du siphon et une colonne de hauteur H reste suspendue au-dessus de chacun des deux vases.

(2) Si la longue branche a une longueur supérieure à H, cette branche ne reste pas remplie de liquide; il se fait un vide au-dessus de la colonne H qui reste soulevée et le liquide du vase supérieur passe à travers ce vide pour rejoindre la colonne H.

Quand la section est petite, il n'est pas nécessaire que la longue branche soit plongée, mais un siphon de forte section doit avoir ses deux

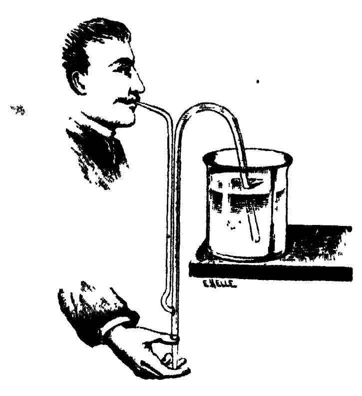


Fig. 215.

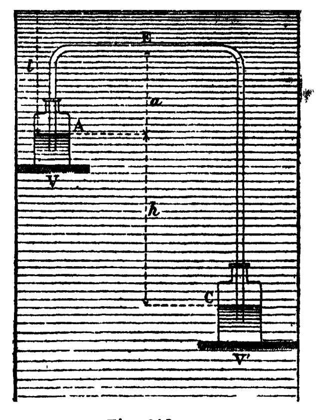


Fig. 216.

orifices submergés, sans quoi de l'air monterait dans la grande branche et diviserait la colonne (1).

Calcul complet de la pression. — Dans le calcul de la pression sur la cloison E, la pression extérieure a été supposée la même.

Supposons que le siphon et les deux vases V et V', contiennent un liquide de densité d et sont plongés dans un fluide de densité δ (fig. 216); la pression en E de gauche à droite sera : $P + l\delta g - adg$ et, de droite à gauche :

$$P + (l + h)\,\delta g - (a + h)\,dg.$$

P est la pression atmosphérique sur la surface du liquide de densité δ; la différence des deux pressions sera : $h\,(d - \delta)g$.

Avec $d > \delta$, le liquide du siphon s'écoule du vase supérieur vers l'inférieur; $d = \delta$, pas d'écoulement; $d < \delta$, écoulement en sens inverse.

187. Fontaine intermittente. — On appelle ainsi un *appareil à écoulement* qui présente des intermittences dues à son fonctionnement. Il se compose d'un ballon en verre B, qui est fermé en haut par un bouchon de verre R usé à l'émeri et qui est garni à sa partie inférieure d'une monture en cuivre C munie de plusieurs tubulures étroites. La monture est traversée en son centre par un tube droit ouvert aux deux bouts. Ce tube s'élève dans le ballon et se termine inférieurement dans une cuvette A percée en son centre d'un orifice (fig. 217).

Fonctionnement. — On remplit le ballon d'eau aux trois quarts et on le bouche. L'eau s'écoule par les tubulures en C; elle s'accumule peu à peu dans la cuvette et *couvre* l'extrémité inférieure du tube si l'orifice

(1) Un siphon qui contient de l'air continue à fonctionner si cet air se loge dans la partie supérieure transversale sans interrompre le liquide. Si le liquide transvasé est de l'eau aérée, l'air se dégage à mesure que l'eau s'élève dans le siphon, puisque la pression supportée va en diminuant. Cet air accumulé finirait par séparer les deux colonnes. On aspire cet air avec une pompe disposée au haut du siphon.

de la cuvette débite moins d'eau que la somme des orifices des tubulures. L'air du ballon, isolé de l'air extérieur, augmente de volume par suite de l'écoulement, sa force élastique diminue ; l'écoulement s'arrête quand la pression extérieure fait équilibre en C à la force élastique intérieure accrue de la pression du liquide. A ce moment, l'eau s'est élevée dans le tube droit jusqu'à une hauteur égale à la hauteur du liquide dans le ballon au-dessus des orifices C. Mais peu à peu la cuvette se vide, le liquide dégage de nouveau l'extrémité inférieure du tube, de l'air rentre alors dans le ballon, et l'écoulement recommence, pour cesser encore après quelques instants.

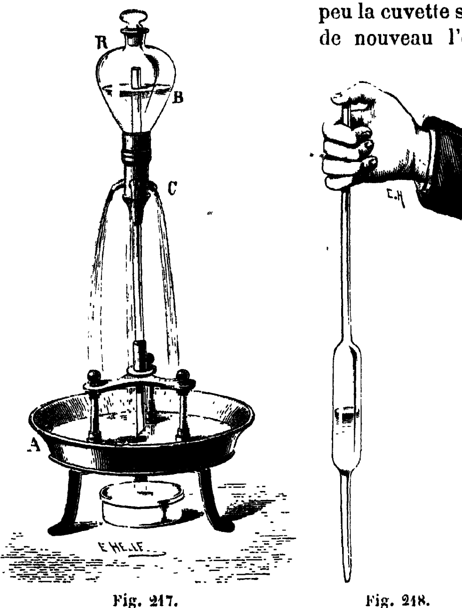


Fig. 217. Fig. 218.

188. Pipette. — Une pipette est un tube droit ouvert aux deux bouts, effilé à la partie inférieure. On plonge la pipette dans un liquide par son extrémité effilée, l'orifice supérieur étant ouvert. Le liquide atteint à l'intérieur le niveau extérieur. On ferme avec le doigt l'orifice supérieur et on sort l'appareil du liquide. Il s'écoule du liquide, jusqu'à ce que la pression du gaz intérieur accrue de la pression du liquide resté fasse équilibre à la pression extérieure ; à ce moment l'écoulement cesse, car l'orifice inférieur est trop étroit pour que l'air y pénètre en divisant la colonne (fig. 218).

Si l'on rend de l'air à l'intérieur en soulevant le doigt, l'écoulement se reproduit ; si l'on rebouche l'orifice, quelques gouttes s'écoulent, puis l'écoulement s'arrête de nouveau.

ÉCOULEMENT DES LIQUIDES

189. Écoulement par orifice en mince paroi. — *Loi de Torricelli.* — Une masse m d'un liquide, qui s'écoule d'un réser-

voir de niveau h, se comporte comme si elle avait une énergie potentielle mgh. La pression exercée par le liquide, à l'origine d'un tuyau de conduite au bas du réservoir, sur une surface S normale à la paroi est $Sp = Sh\delta = Shdg$ (p pression par unité de surface ou pression hydrostatique, δ poids spécifique du liquide, d sa densité).

Si le liquide s'écoule à travers un orifice percé dans une paroi mince (pour réduire le frottement du liquide contre une paroi solide), sa vitesse, à la sortie de l'orifice, est celle qu'il prendrait en tombant de la hauteur h qui sépare l'orifice du niveau libre dans le réservoir; elle est $v = \sqrt{2gh}$. S étant la section de l'orifice, Svt est la quantité de liquide qui s'écoule en un temps t, et $Sv = S\sqrt{2gh}$ est le *débit* par seconde. Il n'a cette valeur qu'à l'endroit où la veine liquide devient cylindrique. On se rapproche du débit théorique avec des ajutages qui, dès l'origine, rendent la veine cylindrique.

190. Écoulement constant. — Avec un siphon, la vitesse d'écoulement n'est pas constante, car la différence des niveaux dans les deux vases varie si les deux vases V et V' n'ont pas la même section.

Un vase qui se vide ne donne pas un écoulement constant, car la vitesse d'écoulement diminue graduellement. On conserve un débit invariable en maintenant constante, par un *trop plein* de décharge, la hauteur h du niveau dans le réservoir. Si le liquide n'arrive pas en quantité supérieure au débit, on a recours au vase de Mariotte.

Vase de Mariotte (fig. 219). — C'est un vase dont le bouchon est traversé par un tube t ouvert aux deux bouts. Sur une paroi latérale est pratiquée une ouverture A. Le vase étant d'abord entièrement plein ainsi que le tube, si on ouvre A, le liquide s'écoule, puisque la pression intérieure, en A, est supérieure à la pression atmosphérique de toute la hauteur aA du liquide. Le tube t se vide et la vitesse d'écoulement diminue alors très vite. Lorsque le niveau du liquide dans le tube est arrivé à son extrémité dans le plan CD, ce qui a lieu rapidement, la pression, en tous les points du plan CD, qui passe par l'extrémité du tube, est égale à la pression atmosphérique qui s'exerce par le tube vide. Le flacon se vide alors à son tour (1), car la pression intérieure en A surpasse la pression atmosphérique de la hau-

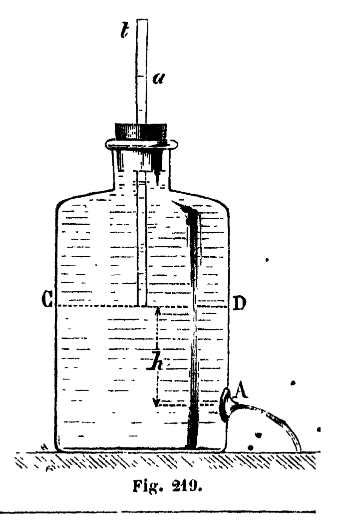


Fig. 219.

(1) A mesure de l'écoulement, l'air rentre bulle à bulle, par la partie inférieure du tube, et, sur le niveau CD, la pression reste égale à la pression atmosphérique.

teur h du liquide comprise entre le plan CD et l'orifice. Tant que le vase contient du liquide au-dessus de CD, la vitesse d'écoulement *reste constante* et égale à $\sqrt{2gh}$ (1). La vitesse décroît dès que, par l'écoulement, le niveau est descendu au-dessous de CD.

La vitesse $\sqrt{2gh}$ se règle en enfonçant plus ou moins le tube t.

191. Écoulement dans un tuyau. — Un réservoir rempli par un liquide, de niveau constant h, se continue par un tuyau de petite section tel que AB (fig. 221) sur lequel sont implantés des tubes verticaux en verre, équidistants. Si le tuyau est fermé à son extrémité par un robinet, le niveau est le même dans les tubes et dans le réservoir. En toute section du tuyau et sur le robinet, la pression par unité de surface est $h\delta$, h étant la hauteur de charge et δ le poids spécifique du liquide (2). L'écoulement a lieu si on ouvre le robinet.

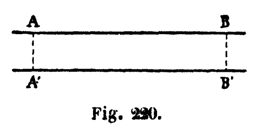


Fig. 220.

I. Tuyau de section uniforme. — Quand un liquide s'écoule régulièrement à travers un tuyau de section uniforme, la vitesse du liquide est la même sur tout le trajet, car une même quantité de liquide passe à travers des surfaces égales AA' et BB' (fig. 220).

Le liquide s'écoulant, la pression diminue le long du tuyau, à mesure qu'on se rapproche de son extrémité, et, dans les tubes verticaux implantés sur le tuyau, le liquide occupe des hauteurs variables. L'abaissement de pression dans ces tubes est *proportionnel aux distances* des points considérés à l'extrémité du tuyau ; les niveaux dans les tubes indicateurs forment *une ligne droite* (fig. 221); entre deux points, la différence de pression représente la force motrice qui produit l'écoulement.

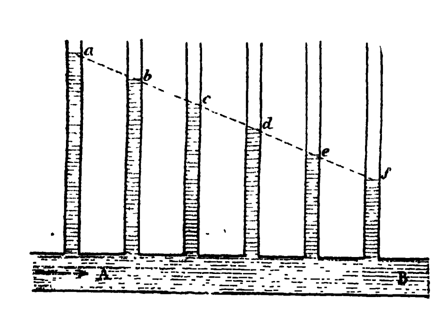


Fig. 221.

II. Tuyaux de sections variables. — A travers un tuyau de section

(1) La vitesse du liquide qui s'écoule est normale à la paroi. En négligeant la résistance de l'air, la trajectoire du jet est celle d'un *projectile lancé horizontalement* avec la vitesse $v = \sqrt{2gh}$. En tout point de sa courbe, le liquide a deux mouvements, l'un horizontal $x = vt$, dû à sa vitesse initiale, l'autre vertical $y = \frac{1}{2} gt^2$ dû à sa chute depuis sa sortie. En éliminant t entre x et y, on obtient l'équation de la trajectoire $x^2 = 4hy$, parabole qui a pour axe une verticale passant par l'origine A (fig. 219).

(2) La pression est gh si le liquide est de l'eau.

variable, la même quantité de liquide passe *encore à travers AA′ et* à travers BB′ (fig. 222), mais la vitesse décroît aux points de plus grande section (1). Avec une conduite formée de parties de sections différentes, la vitesse est maximum dans le tuyau dont la section est la plus faible. Sur les tubes indicateurs, les niveaux forment pour les diverses parties, des droites d'inclinaisons différentes, l'inclinaison étant la plus grande sur le tube le plus étroit (fig. 223). Les chutes de pression représentent encore des fractions de la force motrice totale qui fait écouler le liquide.

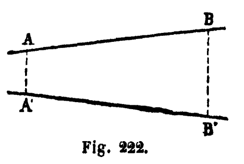


Fig. 222.

Travail dépensé dans l'écoulement. — La pression hydrostatique

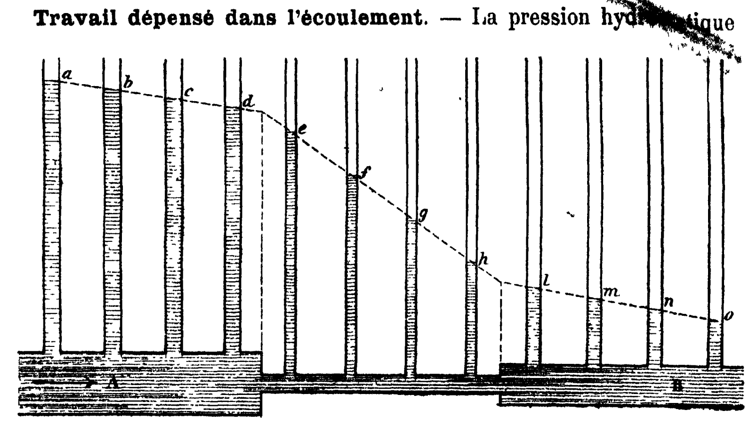


Fig. 223.

étant p à l'orifice d'une conduite d'écoulement de section uniforme S, la pression qui pousse le liquide est pS ; si la vitesse d'écoulement est v, le travail dépensé par seconde pour produire l'écoulement, avec un débit $Sv = D$, est $pSv = pD$.

POMPES A LIQUIDES

Les pompes sont des appareils destinés à élever les liquides.

192. Pompe aspirante. — *Description* (fig. 224). — Une pompe aspirante se compose d'un gros tuyau cylindrique ou *corps de pompe* C, dans lequel se meut un *piston* P. Le piston est percé dans son épaisseur d'ouvertures que ferment des soupapes *b* s'ouvrant de bas en haut ; le corps de pompe communique par un

(1) S et S′ étant les sections en AA′ et BB′, v et v' les vitesses, on a $Sv = S'v'$.

tuyau d'aspiration t avec le *puisard* R, qui contient l'eau à élever.

A l'orifice du tuyau d'aspiration, une soupape *a* s'ouvre aussi de bas en haut; un tuyau de *déversement* r est disposé latéralement à la partie supérieure du corps de pompe.

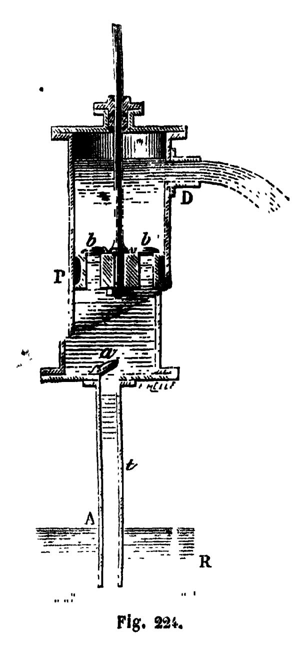


Fig. 224.

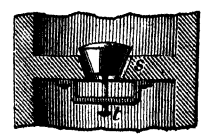
Amorcement. — La pompe fonctionne d'abord comme une machine pneumatique. Au départ, le piston étant *au bas de sa course,* l'eau a le même niveau dans le tuyau et dans le puisard. En soulevant le piston, le vide se fait au-dessous de lui; la soupape *b* (1) reste fermée par son poids et par la pression atmosphérique; la soupape *a* s'ouvre, pressée par l'air du tuyau d'aspiration qui est à la pression atmosphérique; cet air pénètre en diminuant de pression, dans l'espace vide que le piston a laissé au-dessous de lui. Une colonne liquide monte dans le tuyau; sa pression, ajoutée à celle de l'air intérieur dilaté, fait équilibre à la pression extérieure qui s'exerce en A sur la surface libre du puisard.

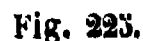
Le piston étant arrivé *au haut de sa course,* la soupape d'aspiration *a* se ferme par son poids et l'eau reste suspendue dans le tuyau d'aspiration au point où elle a été soulevée. En abaissant le piston, l'air du corps de pompe est comprimé; sa pression dépasse la pression atmosphérique, ouvre la soupape *b* et s'échappe.

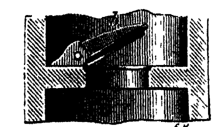
On soulève de nouveau le piston, l'eau continue à monter dans le tuyau d'aspiration, et, par la descente du piston, une nouvelle quantité d'air s'échappe.

Après quelques coups de piston, *si la hauteur du tuyau d'aspiration ne dépasse pas la hauteur barométrique en colonne d'eau* ($10^m,33$), l'eau atteint la soupape *a*, l'ouvre et pénètre dans le corps de pompe. La pompe est alors *amorcée.*

(1) Une soupape repose sur un siège *s*; quand elle se soulève, un butoir *t* limite son déplacement (fig. 225); un *clapet* est une plaque *b* en cuir ou en métal; elle est fixée sur le bord de l'orifice à fermer, par une charnière autour de laquelle elle tourne (fig. 225 *bis*).




Fig. 225.


Fig. 225 *bis.*

Fonctionnement régulier. — *Si la face inférieure du piston soulevé n'est pas à plus de* $10^m,33$ du niveau du puisard (1), l'eau suit le piston dans sa montée et forme une colonne continue puisqu'il n'y a plus d'air dans le corps de pompe ; elle remplit le corps de pompe.

A la descente du piston, la soupape *b* est soulevée par l'eau du corps de pompe qui passe au-dessus du piston. Dans le mouvement ascendant qui suit, cette eau est élevée et versée au dehors par le tuyau D, la soupape *b* restant fermée. A partir du moment où l'eau a rempli le corps de pompe, on déverse au dehors, à chaque coup de piston, un volume d'eau égal au volume du corps de pompe.

Effort dans le fonctionnement régulier du piston. — *Pendant la descente.* — Dans la descente du piston, il suffit de vaincre les frottements ; il n'y a pas d'effort dû à des pressions, puisque la communication existe entre le liquide au-dessus et au-dessous du piston.

Pendant la montée. — Soit h la distance de l'orifice du déversoir à la face supérieure du piston, h' la distance de la face inférieure du piston au niveau dans le puisard, H la pression atmosphérique en colonne d'eau, dg le poids spécifique de l'eau, S la section du piston : la face supérieure du piston supporte de haut en bas une pression $SHdg + Shdg$; la face inférieure supporte de bas en haut une pression : $SHdg - Sh'dg$.

L'effort, dans la montée, est la différence : $S(h + h')\,dg = S(L - e)\,dg$.

L distance verticale de l'orifice du tuyau de déversement au niveau du puisard, e épaisseur du piston.

En négligeant e, l'effort à exercer dans la montée est égal au poids, $SLdg$, d'une colonne d'eau qui a pour base la section du piston et pour hauteur L.

Travail. — Soit λ le parcours du piston, le poids de l'eau qui s'écoule à chaque coup de piston est λSdg, le travail $\lambda SLdg$, dans la montée, élèverait directement l'eau à la hauteur L. Par suite des frottements, la pompe exige un travail supérieur à ce travail direct. Toutefois un levier facilite la manœuvre (fig. 226).

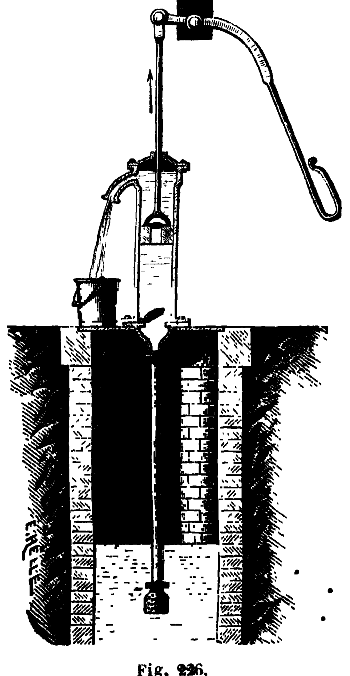


Fig. 226.

193. Pompe foulante. — Il n'y a pas de tuyau d'aspiration. Le corps

(1) A cause des imperfections de la construction, on ne place pas en général la soupape d'aspiration à plus de 7 à 8 mètres au-dessus du puisard.

de pompe plonge *directement* dans le liquide et est muni,à sa partie inférieure, d'une soupape s'ouvrant de bas en haut. Le tuyau par lequel l'eau est refoulée prend naissance latéralement au bas du corps de pompe, il présente à son entrée dans le corps de pompe une soupape qui s'ouvre de l'intérieur à l'extérieur (fig. 227).

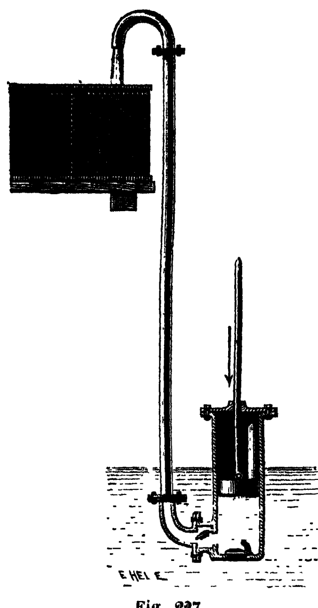


Fig. 227.

Un piston plein se meut à frottement dans le corps de pompe. Quand le piston s'élève, le vide se fait au-dessous de lui, et la pression atmosphérique pousse l'eau dans le corps de pompe. Si le piston s'arrête, la soupape inférieure retombe par son poids. Dans la descente du piston, la soupape latérale s'ouvre, et l'eau monte à une certaine hauteur dans le tuyau d'ascension.

Après quelques coups de piston, l'eau se déverse à la partie supérieure. C'est la pression exercée sur le piston qui élève directement l'eau ; l'effort nécessaire pour abaisser le piston augmente avec la hauteur du tuyau de refoulement, à cause de la pression de l'eau soulevée. La pompe débite, à chaque coup de piston, un volume d'eau égal au volume du corps de pompe. *Rien ne limite la hauteur du tuyau de refoulement* et, par conséquent, la hauteur à laquelle on peut élever l'eau, il suffit d'un effort assez grand.

Effort dans la manœuvre du piston. — *Pendant la montée.* — A part les frottements, il ne faut guère d'effort pour faire monter le piston, car les pressions sur les deux faces sont sensiblement les mêmes.

Pendant la descente. — Soit h la hauteur de l'eau dans le tuyau latéral au-dessus du niveau du réservoir, et H la hauteur barométrique. La soupape latérale étant ouverte, la pression de bas en haut supportée par la face inférieure du piston qui descend est $\mathrm{SH}dg + \mathrm{S}hdg$. La pression de haut en bas supportée par la face supérieure est $\mathrm{SH}dg$.

La différence $\mathrm{S}hdg$ s'exerce de bas en haut; c'est le poids d'une colonne d'eau qui a pour base la section du piston, elle a la hauteur de l'eau dans le tuyau de refoulement au-dessus du réservoir.

Travail. — Si λ est la course du piston, le travail dépensé pour un coup de piston est $\lambda \mathrm{S}hdg$. Le poids de l'eau qui s'écoule par le tuyau latéral est $\lambda \mathrm{S}dg$. Ce travail porterait directement l'eau à la hauteur h.

194. Pompe à incendie. — Les pompes précédentes donnent un jet intermittent. Dans la pompe à incendie, on accouple deux corps de pompe, comme dans une machine pneumatique, de façon que l'un s'emplisse, tandis que l'autre se vide. Les tiges des deux pistons sont articulées à un double levier MM′ qui reçoit un mouvement alternatif (fig. 228). Les tuyaux latéraux des deux corps de pompe sont très courts; au lieu de conduire l'eau dans le tuyau de refoulement, ils débouchent dans un *réservoir intermédiaire clos*, R, rempli d'air. Les deux corps de pompe sont immergés dans un récipient portatif que l'on remplit d'eau; cette eau est refoulée dans le réservoir R, d'où elle est poussée dans la direction voulue à l'aide d'un tuyau T qui plonge jusqu'au fond du réservoir. Ici, l'addition du réservoir d'air au tuyau de refoulement régularise le jet. En effet, l'eau qui s'élève dans le réservoir, commence par comprimer l'air qui s'y trouve; après quelques coups de piston, elle sort par le tuyau, et, comme l'air presse continuellement, l'écoulement est continu.

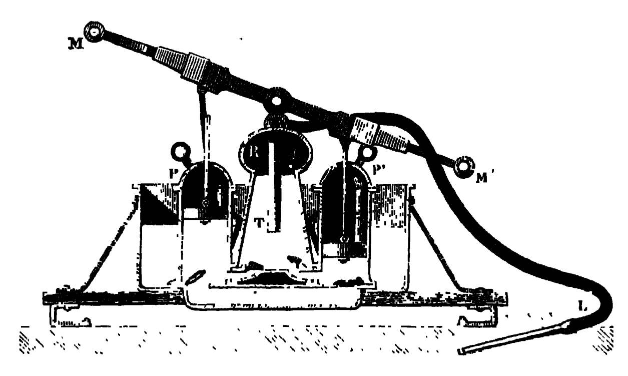


Fig. 228.

195. Pompe aspirante et foulante. — Dans un corps de pompe se meut un piston *plein*. Un tuyau d'aspiration, plongeant dans le puisard, est ajusté à la partie inférieure du corps de pompe; il en est séparé par une soupape qui s'ouvre de bas en haut comme dans une pompe aspirante. A la base du corps de pompe, un tuyau de refoulement latéral porte une soupape qui s'ouvre de l'intérieur à l'extérieur, comme dans une pompe foulante (fig. 229).

Quand on soulève le piston, la soupape de refoulement se ferme, la soupape d'aspiration s'ouvre, et l'air compris dans le tuyau d'aspiration, entre la soupape et le niveau de l'eau, se répand en partie dans le vide formé au-dessous du piston. Par le jeu du piston, on

élève l'eau au-dessus de la soupape d'aspiration, si cette soupape n'est pas à plus de 10m,33 au-dessus du niveau de la nappe d'eau.

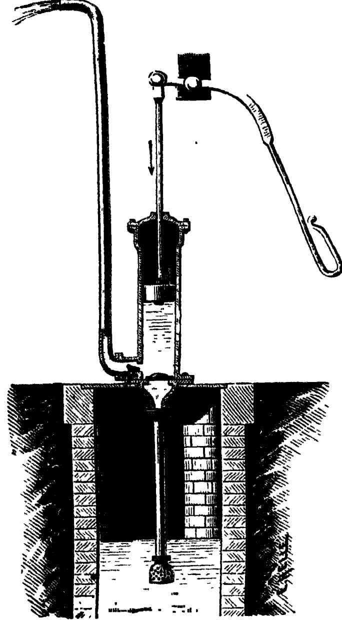


Fig. 229.

Une fois la pompe amorcée, l'eau est poussée pendant la descente du piston dans le tuyau de refoulement. A chaque descente du piston, il sort par l'orifice de déversement un volume d'eau égal au volume du corps de pompe.

196. Presse hydraulique. — Le petit piston d'une presse hydraulique appartient à une pompe aspirante et foulante; il puise l'eau dans un réservoir R et la refoule, par un tuyau, dans un cylindre à parois résistantes A où se meut un large piston P. La pression exercée par l'eau refoulée se transmet à la face inférieure du piston P, et le soulève ; les matières à presser sont comprimées entre un plateau C qui surmonte le large piston et une plate-forme fixe E maintenue par des colonnes (fig. 230).

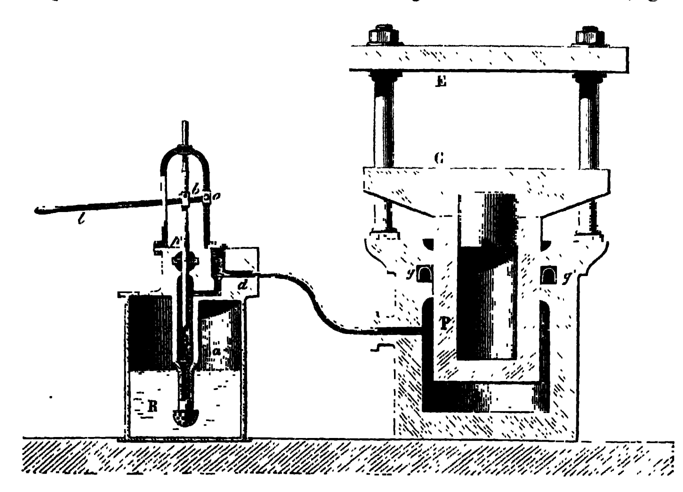


Fig. 230.

Quand la compression a été exercée, on fait écouler l'eau par un

robinet à vis placé sur le trajet du tube et le piston P redescend. Pour que la pression ne dépasse pas la résistance des parois, la pompe est munie d'une *soupape de sûreté*, conique, réglée par un poids.

Effort. — La tige du piston p de la pompe est commandée par un levier. Si la distance ol du point l de l'application de l'effort au point fixe o est égale à 10 fois la distance ob du point fixe au point d'articulation de la tige, un effort de 30 kilos en l vaut un effort de 300 kilos en b (**42**).

En vertu de la transmission des pressions, si la section S du piston P vaut 100 fois la section s du piston p, 300 kilos sur le petit piston produiront en C une pression de 30.000 kilos sur le large piston.

Travail. — Le volume d'eau qui pénètre dans le large cylindre étant égal au volume déplacé par le petit piston, $s\lambda = S\lambda'$, et les courses λ et λ' du petit et du grand piston sont en raison inverse de leurs sections.

Soit p la pression exercée par unité de surface, ps est la pression exercée par le petit piston, pS la pression reçue par le grand. Le travail dépensé $ps\lambda$, et le travail produit $pS\lambda'$, sont égaux, puisque $s\lambda = S\lambda'$. Il y a *conservation du travail* (**40**). La presse hydraulique exerce de grands efforts, mais le déplacement est extrêmement lent. Dans notre exemple, le grand piston s'élève de $0^{mm},1$ pour une course de 1 centimètre du petit. *On perd en chemin parcouru ce que l'on gagne en force.*

Cuir embouti (fig. 231). — Pour empêcher l'eau de s'échapper entre le cylindre et le piston, on loge dans une rainure circulaire gg', pratiquée dans la paroi du cylindre, un cuir embouti, anneau de cuir flexible, en forme de *gouttière renversée* (fig. 231). Par la pression, l'eau s'infiltre entre le cylindre et le piston, pénètre dans la concavité du cuir embouti et l'applique, d'une part contre le piston et, d'autre part, contre le cylindre. La fermeture est d'autant plus hermétique que la pression est plus considérable.

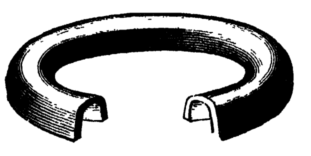


Fig. 231.

On complète la presse hydraulique par un *manomètre* qui mesure la pression et par une *vis latérale* qu'on engage lentement dans le liquide du cylindre A pour augmenter la pression.

Applications. — Les applications industrielles de la *presse hydraulique* sont nombreuses ; on l'emploie comme presse à forger, presse à emboutir, machine à mouler; elle sert pour le foulage des draps, la compression des graines oléagineuses dans la fabrication des huiles, l'extraction du jus de la betterave, la compression de substances encombrantes telles que le coton et le foin, le serrage des tôles des induits des dynamos, l'essai des récipients à gaz comprimés et des chaudières, l'essai de la résistance des matériaux, etc.

Essai des chaudières. — Les chaudières sont essayées avant d'être mises en service. Jusqu'à 6 kilos, on s'assure qu'elles supportent une pression double de la force maximum de la vapeur en fonctionnement normal. L'essai n'est pas effectué avec de la vapeur, mais avec une pression hydraulique qui fait apparaître, en cas de fissure, un écoulement d'eau, sans projection violente.

Si la chaudière doit supporter au plus 5 kilos par centimètre carré, on *la remplit complètement d'eau*, puis on surcharge ses soupapes de façon qu'elles ne s'ouvrent que sous une pression de 10 kilos par centimètre carré.

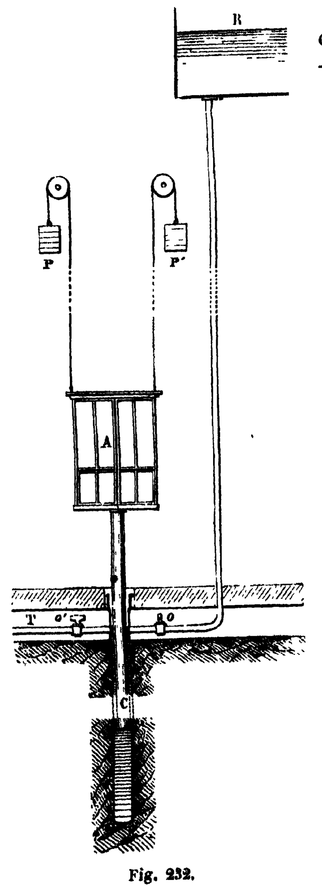


Fig. 232.

Pour cela, on fait communiquer la chaudière avec la pompe foulante d'une presse hydraulique par le tube qui conduisait l'eau dans le grand cylindre. En manœuvrant la pompe, la pression se transmet à la surface intérieure de la chaudière. On élève lentement la pression, jusqu'à ce que l'eau sorte par les soupapes. La chaudière est acceptée si aucune fuite n'a lieu.

197. Ascenseurs hydrauliques. — Les ascenseurs et monte-charges hydrauliques sont une autre application de la pression de l'eau. Un corps de pompe métallique, fermé par le bas et d'une hauteur égale à celle de l'édifice desservi, a été installé verticalement dans le sous-sol. Dans ce corps de pompe tubulaire, s'engage un piston plongeur cylindrique C, qui a la même longueur que le tube et supporte la cabine élévatoire A (fig. 232). A l'aide de robinets *o* et *o'* commandés de l'intérieur de la cabine, le corps de pompe communique tantôt avec un réservoir d'eau de niveau élevé, tantôt avec un tuyau d'échappement T. Le piston étant en bas, si l'on fait arriver l'eau du réservoir dans le corps de pompe, elle presse sur la base du piston et le soulève. Le piston redescend

par son poids quand on ouvre le tuyau d'échappement. Dans sa montée et sa descente, la cabine est guidée par 4 glissières verticales placées à ses angles.

Le système mobile du piston et de la cabine, a un poids considérable qu'on équilibre par des contrepoids P attachés à des chaînes qui passent sur des poulies.

Le niveau de l'eau du réservoir étant à 20 mètres au-dessus du sol, et la base du piston à 20 mètres au dessous, quand le plancher de la cabine affleure au sol, un piston d'une section de 2 décimètres carrés subit une pression initiale de 800 kilogrammes (poids d'un cylindre d'eau de 2 décimètres carrés de base et de 40 mètres de hauteur). A mesure que le piston est soulevé, cette pression diminue; elle n'est plus que 400 kilogrammes au haut de la course. Les contrepoids équilibrant le piston et la cabine, une charge voisine de 400 kilogrammes, peut être soulevée jusqu'au haut de l'édifice.

HISTORIQUE

Notions de mécanique. — Le principe de l'inertie et le principe de l'indépendance des effets des forces sont dus à *Galilée*. *Newton* a énoncé ces deux principes sous leur forme actuelle et y a ajouté le principe de l'égalité de l'action et de la réaction. *Descartes* a le premier présenté une définition précise du travail mécanique; c'est à *Leibnitz* que nous sommes redevables de la notion de la force vive et du théorème de l'équivalence de la force vive et du travail.

Pesanteur. — *Archimède* détermina géométriquement, dans plusieurs cas particuliers, la position du centre de gravité d'un corps homogène.

Les lois de la chute des corps ont été découvertes par *Galilée*. En faisant tomber du haut d'une tour plusieurs sphères de volumes égaux, mais de poids différents, il les vit toutes arriver au sol à peu près en même temps; il attribuait à la résistance de l'air les retards observés pour les moins pesantes. Pour trouver la loi des espaces, il substitua à la chute verticale la chute ralentie sur un plan incliné.

Les lois du pendule sont également dues à *Galilée*. Il découvrit la loi de l'isochronisme en comptant les oscillations d'une lampe suspendue à la voûte d'une église. Le nombre des oscillations restait constant malgré le décroissement graduel des arcs décrits.

La détermination par le pendule de l'intensité de la pesanteur, proposée par *Huygens*, fut appliquée pour la première fois par *Borda*. Huygens eut l'idée d'appliquer le pendule à la régulation des horloges.

Képler avait formulé les lois de la révolution des planètes autour du soleil; *Newton* énonça la loi de la gravitation universelle et démontra que la

pesanteur en est un cas particulier, en faisant voir que l'attraction exercée par la Terre sur la Lune est précisément égale à la pesanteur terrestre, réduite suivant la loi de la raison inverse du carré des distances.

Hydrostatique. — Le principe de la transmission des pressions et de la presse hydraulique fut nettement exprimé par *Pascal.*

Notre démonstration expérimentale de la loi de la pression exercée par un liquide sur le fond du vase qui le renferme est celle de Pascal. Cette loi et la loi des pressions latérales avaient déjà été énoncées par *Stevin,* savant flamand, auquel on doit la règle du parallélogramme des forces.

Archimède avait trouvé la valeur de la poussée exercée de bas en haut sur un corps plongé dans un liquide.

Mécanique des gaz. — *Galilée* démontra la pesanteur de l'air en pesant un ballon de verre d'abord plein d'air pris dans l'atmosphère, puis rempli d'air comprimé; il observa une augmentation de poids.

En 1643, *Torricelli* réalisa l'expérience du baromètre et en donna l'explication confirmée par *Pascal* dans l'expérience du Puy-de-Dôme. Ce fut la découverte de la pression atmosphérique.

La loi de la compressibilité des gaz fut énoncée, à peu près en même temps, par *Boyle* en Angleterre et par *Mariotte* en France (1670). *Despretz* montra en 1827 que les gaz facilement liquéfiables se compriment plus que l'air. Les expériences de *Regnault* (1845) et d'*Amagat* (1880) ont fait voir dans quelles limites la loi de Mariotte peut être appliquée.

Vers 1650, *Otto de Guéricke,* bourgmestre de Magdebourg, invente la première machine pneumatique. Pesant un grand ballon d'abord plein d'air, puis vide, il confirme la pesanteur de l'air déjà établie par Galilée. Il exécute l'expérience des hémisphères de Magdebourg.

Denis Papin emploie, dans la machine pneumatique, deux corps de pompe au lieu d'un, imagine la platine, substitue aux robinets des soupapes qui s'ouvrent et se ferment alternativement par le jeu même de l'appareil.

Une pompe foulante est décrite dans la pneumatique d'*Héron* d'Alexandrie; on y trouve aussi le siphon, la pipette. La théorie du siphon est due à *Pascal.*

La première expérience aérostatique, due aux frères *Montgolfier,* eut lieu en 1783, à Annonay, avec un ballon gonflé avec de l'air chaud. Un projet complet d'aérostat dirigeable fut établi par le général *Meusnier* en 1784. En 1884, les capitaines *Renard* et *Krebs* mirent en service pour la première fois avec succès un ballon dirigeable; la construction des nouveaux appareils a été permise par l'emploi des moteurs légers. C'est aussi aux moteurs légers qu'est dû l'usage récent des aéroplanes.

CHALEUR

Sensations de chaleur et de froid. — Auprès d'un foyer, nous ressentons une *sensation de chaleur*. Le contact d'un morceau de glace détermine une sensation de *froid*. La cause de ces impressions est appelée **chaleur**. Un corps qui s'échauffe *gagne de la chaleur*, un corps qui se refroidit en *perd*.

Les sensations de chaleur et de froid sont reçues par des nerfs qui se trouvent dans tout le corps ; ils ne sont pas localisés dans un organe spécial comme les nerfs sensibles au son et à la lumière.

Effets de la chaleur. — Placés dans les conditions où nous ressentons la chaleur et le froid, les différents corps subissent des changements dans leurs propriétés : 1° changements de dimensions (*dilatations*) ; 2° changements d'état, d'agrégation (*fusion*, *vaporisation*); 3° changements chimiques et électriques (*séparation des éléments* d'un corps composé, *courants thermo-électriques*).

DILATATIONS PAR LA CHALEUR

Le plus souvent, un corps se *dilate* quand il s'échauffe, il se *contracte* quand il se refroidit. Diverses expériences le démontrent.

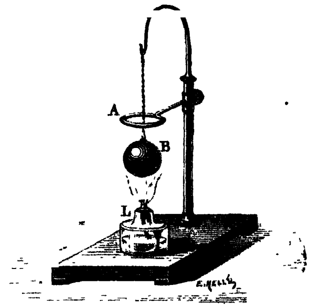


Fig. 233.

198. Solides. — Une sphère métallique B, suspendue par une chaîne, passe librement, mais sans jeu, à travers un anneau A de même métal (fig. 233). Vient-on à chauffer la sphère sans chauffer l'anneau, l'accroissement de son volume ne lui permet plus de traverser l'anneau. Si l'on chauffe également l'anneau et la sphère, le diamètre intérieur de l'anneau reste égal au diamètre de la sphère. La cavité de l'anneau s'est agrandie comme si elle était pleine.

Le pyromètre à levier fait voir l'allongement d'une barre métallique. C'est une tige métallique immobilisée à l'aide d'une vis à l'une de ses extrémités; l'autre extrémité traverse librement une ouverture pratiquée dans une colonne et s'appuie contre la courte branche d'un levier coudé, mobile autour d'un axe fixe. Le long bras se meut sur un cadran CC' (fig. 234). Vient-on à chauffer la tige, l'extrémité libre pousse la courte branche OB (fig. 235).

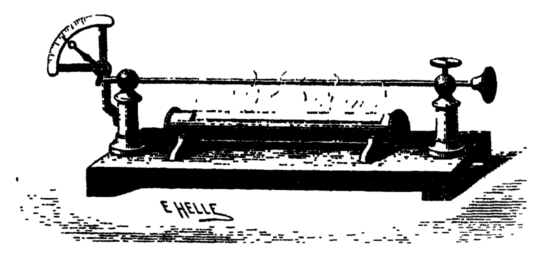


Fig. 234.

Les angles BOB', COC' sont égaux, et si OC $= n$OB, l'arc parcouru par l'extrémité C sera n fois plus long que l'arc décrit par l'extrémité B. Cette amplification rend très apparent l'allongement de la tige.

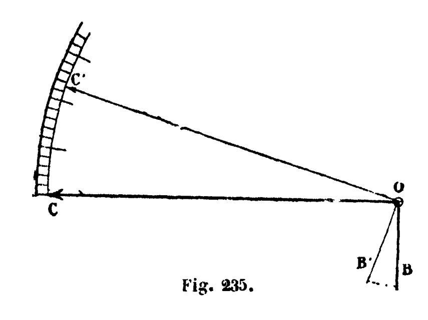


Fig. 235.

Quelques corps, par exemple : le caoutchouc, l'argile, se contractent par la chaleur au lieu de se dilater.

199. Liquides. — Un ballon surmonté d'un long tube étroit contient de l'alcool coloré jusqu'au niveau h. On plonge brusquement le ballon dans un vase plein d'eau chaude (fig. 236); le niveau du liquide se déprime d'abord jusqu'en a, puis il remonte et s'élève en b, au-dessus du niveau primitif.

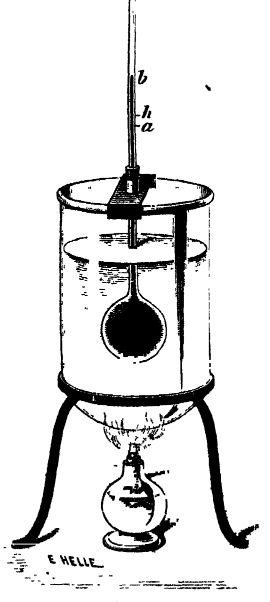


Fig. 236.

La chaleur a d'abord dilaté l'enveloppe, le liquide est descendu dans le ballon dont la capacité a augmenté; mais, en se dilatant à son tour, le liquide dépasse le

niveau initial, parce qu'il se dilate plus que l'enveloppe. La *dilatation apparente* du liquide est l'excès de sa dilatation réelle ou *absolue* sur la dilatation du ballon.

200. Gaz. — Les gaz sont beaucoup plus sensibles à l'action de la chaleur que les solides et les liquides. Ils éprouvent un accroissement de volume et un accroissement de force élastique.

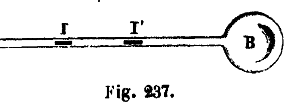


Fig. 237.

Accroissement de volume. — Un ballon B, auquel est adapté un tube *horizontal,* contient un gaz séparé de l'air extérieur par un index liquide I' (fig. 237). En chauffant le ballon avec les mains, l'index est chassé en I. Le gaz *s'est dilaté sans changement de force élastique* puisqu'il est resté soumis à la pression atmosphérique.

Accroissement de force élastique. — On prend un ballon surmonté d'un tube deux fois recourbé (fig. 238); on verse du mercure dans le tube. Si l'on chauffe le ballon, le mercure s'abaisse en *b* et s'élève en *c*. En versant du mercure dans la branche ouverte jusqu'en *c'*, le niveau est ramené en *a* dans la courte branche. La chaleur *augmente* ici *uniquement la force élastique du gaz*. Cette force élastique est devenue égale à la pression atmosphérique accrue de la colonne *ac'*.

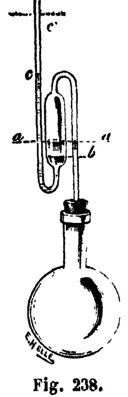


Fig. 238.

La chaleur produit habituellement à la fois sur un gaz les deux accroissements de volume et de force élastique.

MESURE DES TEMPÉRATURES

La température est une qualité des corps chauds; elle est définie d'une manière relative, en mettant en présence deux corps inégalement chauds : le plus chaud se refroidit en cédant de la chaleur au plus froid qui s'échauffe. Cet échange cesse quand les deux corps sont devenus également chauds, ils sont alors dits **à la même température.** Les échanges de chaleur entre deux corps dépendent de leur **différence de température.** Le toucher n'étant ni assez exact [1] ni assez délicat

(1) La sensation du toucher n'apprécie pas sûrement l'état calorifique d'un corps. Ainsi, une main plongée dans la glace a une sensation de froid, l'autre main, plongée dans de l'eau chaude a une sensation de chaleur. En plongeant ensuite les deux mains dans de l'eau tiède, la main qui sort de la glace sent de la chaleur et celle qui sort de l'eau chaude sent du froid; la même eau produit alors deux sensations différentes.

pour apprécier cette différence, on a recours à un appareil spécial appelé *thermomètre*.

201. Thermomètre. — Invariable à température constante, le volume d'un corps croît et décroît avec la température (1). Les volumes d'un même corps, à diverses températures, peuvent caractériser ces températures. Une température *n'est pas une grandeur mesurable* à la façon d'une masse ou d'une quantité d'électricité; car, si on peut définir deux températures égales, on ne peut pas définir une température égale à la somme de deux autres.

Un *thermomètre est un corps dont les volumes servent à repérer les températures*, il fait connaître sa propre température et celle des corps avec lesquels il est en équilibre calorifique.

Des corps de même nature et de mêmes dimensions constitueraient des thermomètres *identiques;* mais, grâce à une graduation établie au moyen de **deux températures fixes**, deux thermomètres de même substance donnent la même indication à une même température, quelles que soient leurs dimensions.

Températures fixes. — Un corps plongé dans la glace fondante conserve un volume constant, tant que dure la fusion : *la température de fusion de la glace est une température fixe.*

Un corps plongé dans la vapeur d'eau bouillante conserve un volume constant, tant que dure l'ébullition : *la température d'ébullition de l'eau, sous une pression déterminée, est fixe* (2).

Principe de la construction d'un thermomètre centigrade. — Ayant choisi pour thermomètre un corps dont le volume peut être apprécié à chaque instant, on le plonge dans la glace fondante où son volume est V_0. Ce volume caractérise le degré *zéro*. Dans la vapeur d'eau en ébullition, sous la pression de 76 centimètres de mercure, le volume V_1 du corps caractérise le degré *cent*.

Un thermomètre à **échelle centigrade** est un thermomètre dont l'accroissement de volume $V_1 - V_0$ entre les deux points de l'eau bouillante et de la glace fondante est divisé en *cent parties égales*.

Une élévation de température, dite de 1°, correspond au centième de la dilatation du thermomètre entre les deux points fixes.

La température d'une enceinte sera t degrés si l'accroissement de volume $V - V_0$ du thermomètre est égal aux t centièmes de son

(1) De nombreux phénomènes varient quand un corps devient plus chaud ou plus froid (volume, pression, indice de réfraction, résistance électrique, etc.); ils peuvent tous caractériser les températures.

(2) Sous une pression déterminée, la température de fusion et la température d'ébullition d'un *corps quelconque* sont des températures fixes.

accroissement de volume $V_1 - V_0$ entre les deux points fixes :

$$V - V_0 = t\frac{V_1 - V_0}{100}.$$

Choix d'une substance thermométrique. — Si la chaleur ne les décompose pas, un liquide ou un gaz reprennent toujours un *même volume à une même température;* un solide peut se modifier avec le temps et, à la suite de dilatations, ne pas revenir rigoureusement au même volume, à une même température.

202. Thermomètre à mercure. — Un thermomètre à mercure consiste en un réservoir de verre en forme d'olive renfermant du mercure et surmonté d'un tube étroit et cylindrique.

Le choix du mercure est avantageux : le mercure est obtenu pur; son point de congélation et son point d'ébullition sont éloignés des températures usuelles; bon conducteur, il se met rapidement en équilibre de température avec l'enceinte dans laquelle il est plongé; par son opacité, il reste visible dans une tige très étroite.

Définition du degré. — Le degré centigrade est ici *l'élévation de température qui correspond à la centième partie de la dilatation apparente du mercure dans le verre, quand il passe de la glace fondante à l'eau bouillante, sous la pression d'une atmosphère.*

Construction. — *Choix du tube.* — On choisit un tube capillaire à parois épaisses, régulièrement cylindrique, ou *bien calibré.* Cette condition est remplie si, en promenant dans le tube une petite colonne de mercure (fig. 239), elle occupe une même longueur *ab* dans toutes ses positions. On soude un réservoir à l'une des extrémités du tube.



Fig. 239.

Remplissage. — A l'autre extrémité du tube, on soude une ampoule plus volumineuse que le réservoir et terminée par une pointe ouverte; l'ampoule ayant été chauffée légèrement pour qu'une partie de son air s'échappe, on *plonge la pointe* dans du mercure pur et sec (fig. 240). L'air resté dans l'ampoule se refroidit, sa force élastique décroît et la pression atmosphérique y fait entrer du mercure. Quand le mercure introduit paraît suffire pour remplir le réservoir et la tige, on *redresse* l'appareil.

L'air de la tige capillaire empêche le mercure de l'ampoule de descendre; mais, si l'on chauffe le réservoir et la tige, il s'échappe de l'air, par bulles, à travers le mercure; la force élastique de l'air restant diminue par le refroidissement et la pression atmosphérique pousse le mercure (fig. 241).

On fait bouillir le mercure en chauffant l'appareil sur une grille incli-

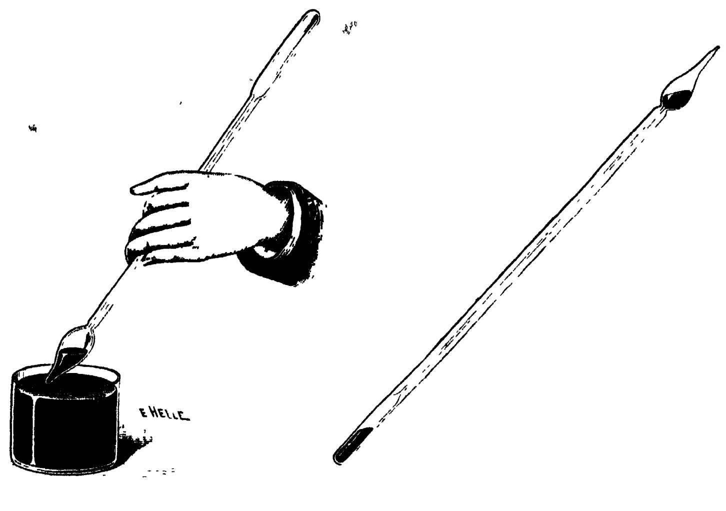


Fig. 240. Fig. 241.

née (fig. 242); les vapeurs mercurielles entraînent, en se dégageant, ce qui restait d'air et d'humidité dans le tube et le réservoir.

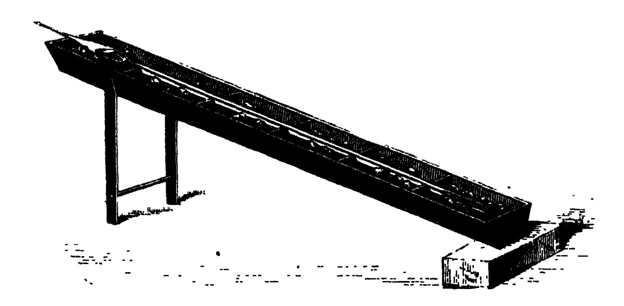


Fig. 242.

On plonge le tube dans un bain liquide d'une température supérieure à la plus élevée que l'appareil devra marquer; par la dilatation, le mercure en excès passe dans l'ampoule, on sépare alors l'ampoule de la tige et on ferme l'extrémité du tube à une lampe d'émailleur. Le mercure se contracte par un nouveau refroidissement.

203. Détermination des points fixes. — 1° *Point zéro.* — Le thermomètre est plongé dans de la glace fondante pilée. Cette glace est contenue dans un vase A, dont le fond est percé d'un trou pour l'écoulement de l'eau de fusion (fig. 243). Le niveau du mercure étant devenu *stationnaire,* on y marque un trait fin avec un diamant. C'est le zéro de l'échelle.

2° *Point 100*. — Le thermomètre est plongé, non dans l'eau bouil-

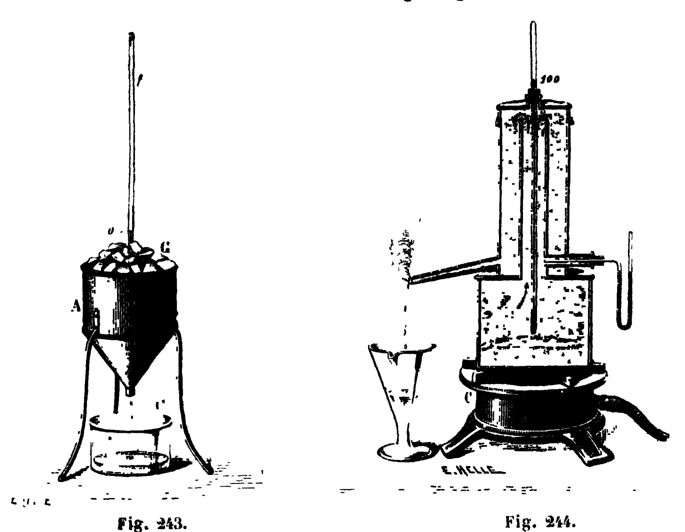


Fig. 243. Fig. 244.

lante, *mais dans sa vapeur*, dont la température ne dépend que de la pression extérieure (**272**).

Le thermomètre est suspendu, à quelques centimètres au-dessus de l'eau, dans le manchon central d'une chaudière métallique à double enveloppé (fig. 244). La vapeur circule dans la deuxième enveloppe annulaire avant de s'échapper par un tube latéral inférieur et protège le manchon central contre un refroidissement dû à l'air extérieur. Un petit manomètre indique, par l'égalité de ses niveaux, que l'ébullition a lieu sous la pression extérieure.

Quand le mercure est devenu *stationnaire* dans la tige, on *consulte le baromètre* et on marque un trait au niveau du mercure. Si la pression est 76, ce trait est le point 100; si la pression $76 + h$ diffère peu de 76, le quotient $\frac{h}{2{,}7}$ donne la fraction de degré à ajouter à 100, car au voisinage de la pression 76, la température de la vapeur d'eau bouillante varie sensiblement de 1° quand la pression atmosphérique varie de 2cm7.

T étant le degré obtenu (très voisin de 100°), on divise, avec une machine à diviser, l'intervalle, entre les deux points fixes, en T parties d'égale longueur appelées *degrés*. La division est prolongée en dehors des points fixes en conservant aux traits le même écartement; au-dessous de zéro le signe — précède les degrés.

Échelles thermométriques. — Dans l'échelle **centigrade**, la plus employée, l'intervalle des deux points fixes est divisé en 100 parties.

Dans l'échelle de **Réaumur**, usitée en Suisse, on marque 0° et 80° aux mêmes points fixes et on divise l'intervalle en 80 parties.

Dans l'échelle de **Fahrenheit**, usitée en Angleterre, on marque 32 et 212 aux points fixes ; l'intervalle comprend 180 divisions.

Correspondance des échelles thermométriques. — Sur un thermomètre portant les trois graduations (fig. 245), appelons c la longueur d'une division sur l'échelle centigrade, r sur l'échelle de Réaumur, et f sur l'échelle de Fahrenheit.

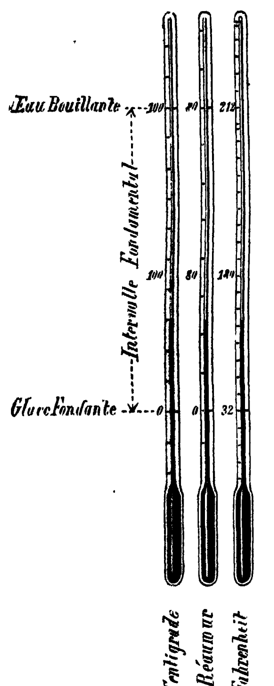


Fig. 245.

L'intervalle compris *entre les deux points fixes*, est égal à :

$$100c = 80r = (212 - 32)\ f.$$

C, R et F étant les nombres de degrés marqués sur les trois échelles *à une même température*, la longueur comprise entre le zéro et le niveau du mercure est de nouveau la même sur les trois échelles ; de là :

$$Cc = Rr = (F - 32)\ f. \quad \text{D'où par division :}$$

$$\frac{C}{100} = \frac{R}{80} = \frac{F - 32}{180}$$

$$\text{ou} \quad \frac{C}{5} = \frac{R}{4} = \frac{F - 32}{9},$$

équations employées pour les conversions.

Déplacement du zéro. — Dans la glace fondante, le mercure d'un thermomètre s'arrête un peu au-dessus du zéro. En effet, par suite d'un travail moléculaire du verre après la construction, le zéro remonte et ne se fixe qu'après plusieurs années. Le point 100 se déplace d'une quantité sensiblement égale, car la tige n'éprouve pas de variation appréciable et l'intervalle de 0 à 100 reste constant. On détermine le zéro après chaque observation ; on a la véritable température en retranchant de la lecture le déplacement du zéro.

Sensibilité d'un thermomètre. — L'accroissement de volume est proportionnel à la masse qui se dilate ; d'après cela, avec un thermomètre à grand réservoir et à tige fine, la longueur du degré permet une subdivision en dixièmes et même en centièmes de degré.

D'autre part, un thermomètre ne se met *rapidement* en équilibre avec le milieu que si le réservoir a de petites dimensions.

Ces deux sensibilités s'excluent et, suivant les circonstances, on recherche l'une ou l'autre.

204. Mesure des températures très basses. — Le thermomètre à mercure ne peut servir qu'entre $-\ 40^0$, température de sa congélation et $+\ 360^0$, température de son ébullition.

Thermomètre à alcool. — Un thermomètre à alcool descend au-dessous de — 40°. Pour remplir le thermomètre, on chauffe le réservoir, puis on plonge dans l'alcool l'extrémité ouverte de la tige; l'alcool occupe la tige et une partie du réservoir; on redresse l'instrument et on fait bouillir un instant le liquide; en plongeant de nouveau la tige dans l'alcool, le thermomètre se remplit (1). On ferme à la lampe en laissant un peu d'air dans la tige.

Le zéro se détermine *directement* dans la glace. Un autre point de l'échelle est obtenu en plongeant l'instrument dans un bain dont la température est donnée par un thermomètre à mercure. Ce thermomètre ne peut servir au-dessus de 78°, point d'ébullition de l'alcool.

L'alcool devenant visqueux bien avant son point de solidification, on se sert quelquefois de thermomètres à *toluène*. Comme le toluène bout à 110°, les deux points fixes peuvent, dans ce cas, être déterminés directement.

Des thermomètres à *éther de pétrole* peuvent être employés jusque vers — 200°. Aux températures très basses, ces divers thermomètres sont gradués par comparaison avec un thermomètre à hydrogène (**206**).

205. Thermomètres à maxima et à minima. — La *température moyenne* d'un jour s'obtient en notant la température d'heure en heure et en divisant par 24 la somme des 24 observations. Le résultat diffère peu de la demi-somme du maximum et du minimum pendant les 24 heures.

Les thermomètres à maxima et à minima *conservent* le maximum et le minimum, sans qu'on ait à suivre leurs indications successives.

Le *thermomètre à maxima* est un thermomètre à *mercure*, dont la tige, recourbée horizontalement, renferme un index de **fer** *ac* qui glisse librement; quand la température s'élève, le mercure, ne mouillant ni le verre, ni le fer, pousse l'index sans s'engager autour de lui; si la température s'abaisse l'index reste en place (fig. 246). L'extrémité de l'index *la plus rapprochée* du réservoir marque le maximum.

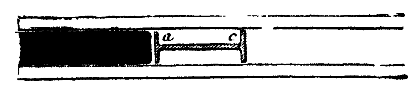


Fig. 246.

Le thermomètre à minima est un thermomètre à *alcool* dont la tige, recourbée horizontalement, renferme un index en **émail** *uv;* l'alcool, mouillant à la fois le verre et l'émail, enveloppe l'index et l'entraîne par adhérence en se contractant (fig. 247); en se dilatant, il le laisse en place et glisse autour de lui. L'extrémité de l'index *la plus éloignée* du réservoir marque le minimum.

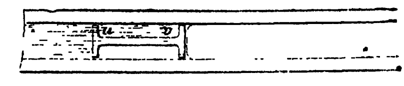


Fig. 247.

(1) Il reste fréquemment une bulle dans le réservoir; on attache alors le tube à l'extrémité d'une ficelle et on lui donne un mouvement de fronde; revenant vers le centre du mouvement, la bulle passe dans la tige d'où on l'expulse facilement.

Pour la mise en expérience d'un de ces appareils, on abaisse la tige, afin d'amener par la pesanteur les index aux extrémités des colonnes liquides; on replace ensuite la tige horizontalement.

206. Thermomètre normal. — Dans les mesures précises, on a pris pour thermomètre étalon, un *thermomètre à gaz.* Étant très dilatables, les gaz sont des substances thermométriques très sensibles, ils peuvent être employés *depuis les températures les plus basses jusqu'aux températures les plus élevées.*

On appelle *degré centigrade* la variation de température qui communique à une masse d'*hydrogène,* assujettie à conserver un volume constant, une *variation de force élastique égale à la centième partie de sa variation* entre la glace fondante et la vapeur d'eau bouillante, la force élastique initiale dans la glace étant 1 mètre de mercure.

Thermomètres à mercure gradués. — Une mesure au thermomètre normal exigeant une opération longue et délicate, le thermomètre à mercure reste le thermomètre *pratique.* Si l'on corrige le déplacement du zéro, un thermomètre à mercure s'accorde avec le thermomètre normal entre 0^0 et 100^0 ; en dehors de ces limites. on le gradue par comparaison avec le thermomètre normal.

DILATATION DES SOLIDES

FORMULES DES DILATATIONS

207. Dilatation linéaire. — Des barres de même longueur et de substances différentes se dilatent inégalement.

On montre l'*inégale* dilatabilité des métaux avec une lame formée d'un ruban de laiton L rivé à un ruban de fer F. En chauffant, le laiton se dilate plus que le fer, la bande se courbe, le laiton occupe le côté convexe, c'est-à-dire le plus long (fig. 248).

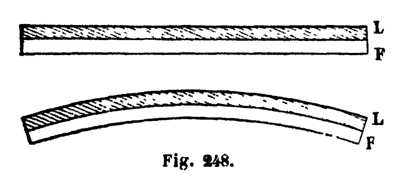


Fig. 248.

L'allongement d'une barre homogène chauffée est proportionnel à sa longueur, car il est la somme des allongements des diverses parties. L_0 désignant la longueur d'une barre à 0^0, L sa longueur à t^0, et l l'accroissement de l'unité de longueur,

$$L = L_0 + L_0 l = L_0 (1 + l).$$

Entre 0^0 et 100^0, l'allongement l est sensiblement proportionnel à l'élévation de température. On pose $l = \lambda t$.

Le *coefficient de dilatation linéaire,* λ, est l'allongement constant de l'unité de longueur pour une élévation de température de 1^0;

$$L = L_0 \; (1 + \lambda t),$$

$1 + \lambda t$ est le *binôme de dilatation* linéaire. L'une des quantités, L_0, L, λ ou t, peut être calculée quand les trois autres sont connues.

208. Dilatation superficielle. — Soit S_0 la surface d'une plaque solide à 0^0, S sa surface à t^0, a l'accroissement de surface d'un centimètre carré, on a : $S = S_0 \; (1 + a)$.

La surface d'un carré d'une substance homogène dont le côté mesure un centimètre à 0^0, est un centimètre carré; chacun des côtés s'allonge de l, de 0^0 à t^0; la surface reste un carré et devient $(1 + l)^2$ ou $1 + a$; en négligeant l^2 on écrit $a = 2l$. La figure 249 montre l'augmentation de surface et la portion négligée.

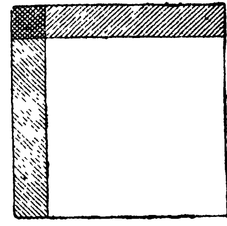


Fig. 249.

209. Dilatation cubique. — Dans un corps homogène et *non cristallisé,* uniformément chauffé, chaque unité de longueur s'accroît également en toute direction et le corps chaud reste géométriquement semblable au corps froid. Soit V_0 le volume d'un corps à 0^0, V son volume à t^0, l'augmentation de volume est la somme des augmentations des différentes parties, elle est donc *proportionnelle au volume* V_0; c étant l'accroissement de volume de l'unité de volume, on a :

$$V = V_0 + V_0 c = V_0 \; (1 + c).$$

Un corps taillé en cube, ayant à 0^0 ses arêtes égales à un centimètre, a un volume d'un centimètre cube; de 0^0 à t^0 chacune des arêtes s'allonge de l, il reste un cube en se dilatant, et son volume devient $(1 + l)^3$, ou $1 + c$.

$$1 + c = (1 + l)^3 = 1 + 3l + 3l^2 + l^3.$$

En négligeant $3l^2$ et l^3 qui sont très petits, on a $c = 3l = 3\lambda t$. *La dilatation cubique est donc le triple de la dilatation linéaire.*

Posons $c = Kt$, on a $K = 3\lambda$, le *coefficient* K *de dilatation cubique*, accroissement de l'unité de volume d'un corps pour un échauffement de 1^0, est le triple du coefficient de dilatation linéaire.

Les relations $c = 3l$, $a = 2l$ s'appliquent aux corps qui restent semblables à eux-mêmes en se dilatant; pour les cristaux qui n'appartiennent pas au système cubique, l varie avec la direction.

210. Décroissement de la densité. — La masse d'un corps ne varie pas avec la température. Pour un même corps, le volume et la densité étant V et D à t^0, V_0 et D_0 à 0^0, on a $VD = V_0D_0$.

Le volume augmentant, la *densité diminue quand la température s'élève,* puisque le produit est constant.

Remplaçons V par sa valeur $V_0(1 + Kt)$ à t^0;

$$V_0(1 + Kt)D = V_0D_0, \quad \text{par suite } D = \frac{D_0}{1 + Kt}.$$

Les relations établies pour les solides conviennent aux liquides ; toutefois pour ceux-ci, sauf pour le mercure, les dilatations cessent d'être proportionnelles aux températures.

DILATATION LINÉAIRE DES SOLIDES

211. Méthode de Lavoisier et Laplace. — *Appareil et principe de la méthode.* — L'appareil de Lavoisier et Laplace (fig. 250) consiste en une cuve métallique C dans laquelle une barre *s* du solide à expérimenter, d'environ 2 mètres, est disposée horizontalement sur des rouleaux de verre *r*. Par une de ses extrémités E, la barre bute contre un montant fixe M (fig. 251) relié à deux piliers en ma-

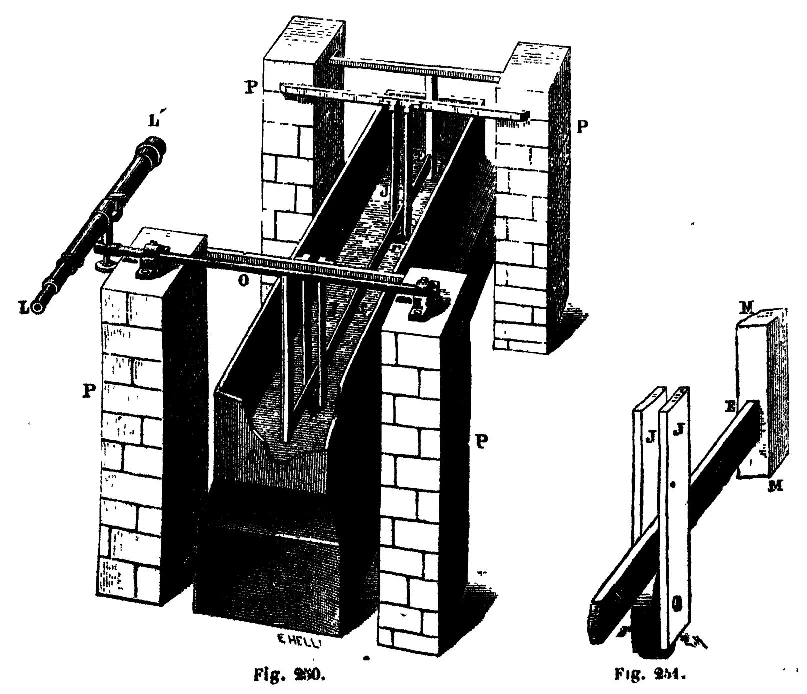


Fig. 250. Fig. 251.

çonnerie P. Par l'autre extrémité, elle pousse une tige verticale formant la courte branche d'un levier coudé à angle droit qui tourne autour d'un axe O. La grande branche du levier est la ligne de visée OA d'une lunette LL' mobile dans un plan vertical et dirigée sur une règle divisée éloignée. Si la barre se dilate, son extrémité libre C vient en D et la ligne de visée passe de OA à OB (fig. 252).

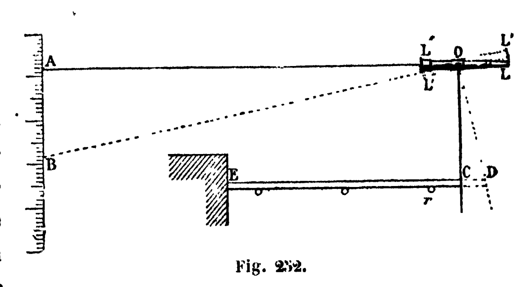


Fig. 252.

L'allongement CD correspond à une longueur AB sur la règle.

Les angles COD, AOB étant égaux, les deux triangles rectangles auxquels ils appartiennent sont semblables; par conséquent,

$$\frac{CD}{AB} = \frac{OC}{OA}, \quad \text{d'où} \quad CD = \frac{OC}{OA} AB.$$

Expérience. — La cuve ayant été remplie de glace fondante et la barre s'ayant pris la température 0°, on vise avec la lunette une division A. On remplace la glace par de l'eau que l'on fait bouillir ou par de l'huile chaude à t^0 : la barre se dilate, et son extrémité libre pousse la courte branche du levier qui tourne d'un angle COD; la ligne de visée tourne du même angle et prend une direction OB. On note la longueur AB (1).

212. Méthode micrométrique. — La barre porte deux traits parallèles *a* et *b* tracés perpendiculairement à sa longueur au voisinage des deux extrémités. La barre se dilate librement aux deux bouts, dans une auge A que l'on peut refroidir à 0° ou chauffer à T°. Aux extrémités de

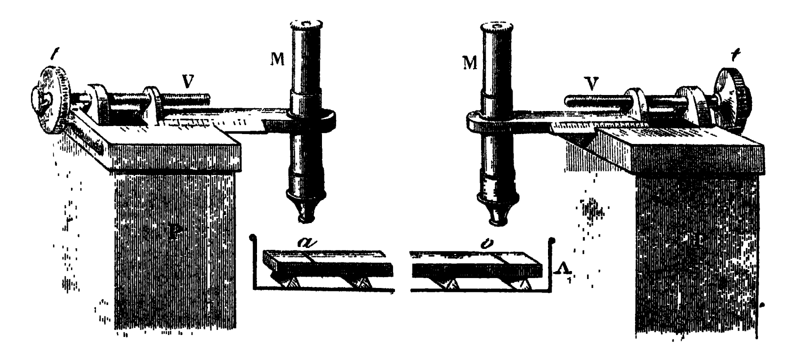


Fig. 253.

(1) Dans l'appareil de Lavoisier et Laplace, OA était égal à 200 mètres et $\frac{OC}{OA}$ à $\frac{1}{744}$; $\frac{AB}{744}$ représentait l'allongement CD de 0° à t^0.

l'auge sont installés de forts piliers P en maçonnerie; chacun d'eux porte un *microscope* vertical M muni d'un *réticule* à fils croisés; le microscope peut être déplacé par une vis micrométrique V (fig. 253). La tête de la vis porte un *tambour t* divisé en 100 parties égales et mobile devant un repère fixe. Pour un tour complet du tambour, si le pas de la vis est de 1 millimètre, le microscope avance d'un millimètre; il avance de $0^{mm}01$, quand le tambour tourne d'une division.

Expérience. — 1° La barre étant à 0°, on règle les microscopes de façon à voir respectivement les deux traits *a* et *b* sous la croisée des fils des

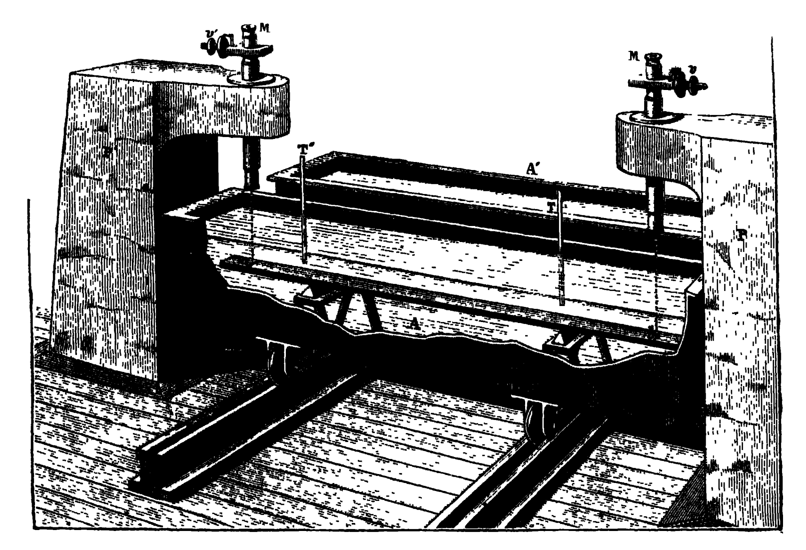


Fig. 254.

réticules. — 2° Une règle étalon est contenue dans une auge A', A et A' étant parallèles et mobiles sur des rails (fig. 254), on amène la barre et la règle à se remplacer sous les microscopes. L'intervalle compris sur la règle, entre les microscopes, est la longueur l_0 de la barre. — 3° On chauffe la barre T° et on la ramène sous les microscopes. Les deux traits *a* et *b* se sont écartés en *a'* et *b'*; on fait jouer les vis micrométriques pour rétablir la coïncidence des images des deux traits avec les croisées fils des réticules. Si les tambours ont été déplacés de *n* et *n'* divisions, l'allongement est : $\frac{1}{100}(n + n')$ millimètres.

Dans la pratique, *les microscopes* M *sont fixes* (fig. 254), mais le réticule est porté par un cadre que l'on déplace à l'aide d'une vis micrométrique *v* ou *v'* munie d'un tambour. A 0°, on vise le trait *a* en amenant le croisement des fils du réticule à couvrir l'image de ce point à travers le microscope.

Après la dilatation, le point *a* est venu en *a'*; en déplaçant le réticule avec la vis micrométrique, on le fait coïncider avec *a'*. L'intervalle lu sur les

micromètres, en visant a et a' (fig. 255), n'est pas la longueur aa' que nous avons exprimée plus haut par $\frac{n}{100}$ millimètres, mais son *image grossie*. D'après le grossissement linéaire de l'objectif du microscope, on calcule aa'. On obtient de même bb'.

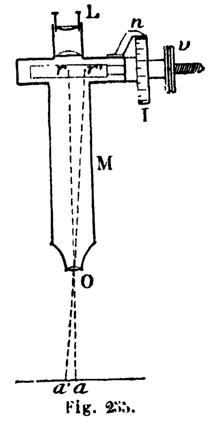


Fig. 255.

213. *Résultats.* — Entre 0° et 100°, l'allongement d'un métal ou du verre est ***sensiblement proportionnel à l'élévation de la température;*** on a $l = \lambda t$, et il y a un ***coefficient de dilatation.*** Au-dessus de 100°, la dilatation croît plus vite que la température, $l = \lambda t + \lambda' t^2$; les coefficients λ et λ', variables avec la nature du corps, se déterminent par deux expériences faites, l'une de 0° à t° et l'autre de 0° à t°.

Les barres reprennent leur longueur initiale après le refroidissement. Le zinc est le métal qui se dilate le plus. L'égale dilatation du verre et du platine facilite leur soudure.

COEFFICIENTS DE DILATATION LINÉAIRE (1) ENTRE 0° ET 100°

Zinc	0,000031	Fer	0,000012
Plomb	0,000028	Platine	0,000008
Argent	0,000019	Verre	0,000008
Cuivre	0,000017	Acier invar (2)	0,000001

DILATATION DES LIQUIDES

Un liquide étant enfermé dans un vase, le vase augmente de capacité quand on l'échauffe, ce qui masque une partie de la dilatation du liquide.

Dulong et Petit ont mesuré la dilatation vraie ou absolue du mercure par une *méthode indépendante de la dilatation de l'enveloppe.*

214. Dilatation absolue du mercure. — ***Principe de la méthode.*** — Soient deux tubes verticaux de même diamètre, reliés à leur partie inférieure par un tube horizontal très étroit (fig. 256) et remplis de mercure. Le liquide s'élève à la même hauteur dans les deux branches, quand elles ont la même température. En maintenant l'un des tubes à 0°, si on porte l'autre à t°, le liquide chaud de densité

(1) Les coefficients de dilatation cubique se calculent en multipliant par 3 les coefficients de dilatation linéaire.

(2) Acier à 35 pour 100 de nickel.

plus faible, s'élève à une plus grande hauteur. Une différence de niveau s'établit dans les deux tubes comme s'il s'agissait de deux liquides différents (**148**). La dilatation des tubes n'exerce pas d'influence sur la hauteur des liquides.

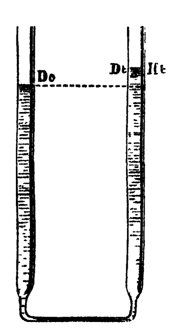


Fig. 256.

Le tube de communication étant *très étroit,* le frottement du liquide contre les parois s'oppose au mélange du mercure chaud et du mercure froid.

Désignons par H_0 et H_t les hauteurs du mercure dans les deux tubes *au-dessus de l'axe du tube de communication,* par D_0 et D_t les densités du mercure à 0° et à t^0. D'après la condition d'équilibre dans deux vases communiquants, ***les hauteurs des deux liquides sont en raison inverse de leurs densités.*** On a donc :

$$\frac{H_t}{H_0} = \frac{D_0}{D_t};$$

or $\frac{D_0}{D_t} = 1 + \mu_t$ donc $\frac{H_t}{H_0} = 1 + \mu_t$

μ_t dilatation de l'unité de volume du mercure de 0° à t^0.

Description de l'appareil. — Les tubes A et B qui contiennent le mercure sont assez larges à leur partie supérieure pour qu'il n'y ait pas de dépression capillaire(1); A est entouré d'un manchon rempli de glace

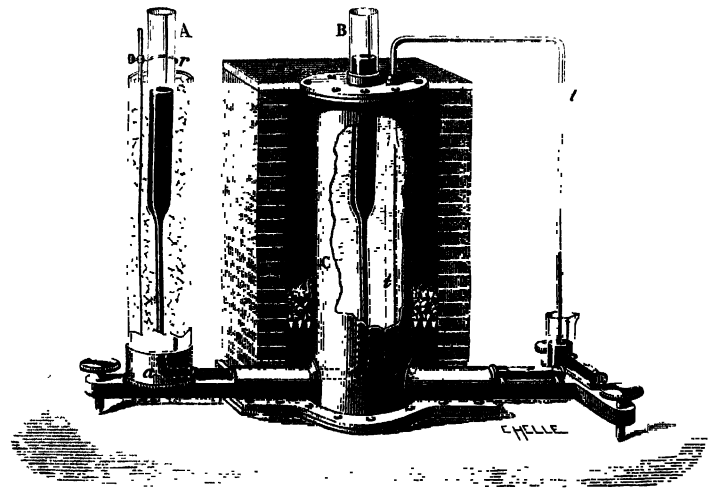


Fig. 257.

(1) *A une même température,* les dépressions capillaires sont égales pour un même liquide contenu dans deux tubes communiquants de même diamètre, mais elles sont iné-

pilée, B est placé dans un cylindre de cuivre C, plein d'huile, que l'on chauffe dans un fourneau. La température est indiquée par un thermomètre à gaz t, plongé dans l'huile à côté du tube B (fig. 257).

Le tube ab de communication est fixé sur une règle métallique en forme de T, rendue horizontale à l'aide de vis calantes. Une tige verticale en fer, portant un repère r, est placée dans la glace à côté du tube A.

Expérience. — L'huile étant chauffée au voisinage de la température à laquelle on veut faire une mesure, on ferme les ouvertures du fourneau; la température monte encore un peu et atteint un maximum où elle reste, avant de descendre, assez longtemps *stationnaire,* pour qu'on puisse mesurer $H_t - H_0$, H_0 et t.

La distance R du repère r à l'axe du tube horizontal ab ayant été déterminée avec soin, on mesure avec un cathétomètre : 1° la distance h du repère au niveau du mercure froid, d'où $R - h = H_0$; 2° la différence $H - H_0$ des niveaux dans les deux tubes.

Résultats. — Entre 0° et 100°, la dilatation du mercure est sensiblement proportionnelle à l'élévation de température marquée par un thermomètre normal. On peut donc écrire $\mu_t = \mu t$. Dans cet intervalle, le coefficient μ de dilatation du mercure est $\frac{1}{5550}$.

Au-dessus de 100°, la dilatation croît plus vite que proportionnellement à la température, la courbe de dilatation n'est plus une droite.

La dilatation du mercure entre 0° et $t°$ peut être représentée par une formule empirique $\mu_t = at + bt^2$; a et b sont des nombres qu'on détermine par deux expériences faites entre des températures différentes. Le coefficient moyen entre 0° et $t°$ est $a + bt$.

Si la dilatation du mercure était proportionnelle à la température t du thermomètre normal, on aurait $V_t - V_0 = V_0\mu t$, $V_{100} - V_0 = V_0\mu_{100}$ et d'après l'équation : $V_t - V_0 = t\,\frac{V_{100} - V_0}{100}$, la température d'un thermomètre basé sur la dilatation absolue du mercure serait la température t du thermomètre normal; elle est en réalité différente. Ainsi pour $t = 300°$, on a $V_{300} - V_0 > 3\,(V_{100} - V_0)$

et l'équation $V_{300} - V_0 = t'\,\frac{V_{100} - V_0}{100}$ donne $t' > 300$.

215. Dilatation d'un liquide quelconque. — La méthode des tubes communiquants est souvent inapplicable à cause de l'évaporation rapide qui se produit à la surface de la plupart des liquides quand on les chauffe.

On renferme alors le liquide dans une enveloppe qui se dilate elle-même. La connaissance de la dilatation vraie du mer-

---

gales si les tubes ont des températures différentes. Les dépressions sont négligeables lorsque les diamètres dépassent 3 cm. aux points où se fixent les niveaux.

cure permet d'évaluer l'accroissement de capacité de l'enveloppe.

Méthode du thermomètre à tige. — ***Jaugeage du thermomètre.*** — On prend un thermomètre dont la tige *cylindrique* est divisée en parties d'égale longueur. On détermine, par des pesées de mercure, le *volume* R_0 *du réservoir* à 0^0 jusqu'à l'origine de la graduation et le *volume* v_0 *d'une division.*

Pour obtenir R_0, on pèse le thermomètre vide, puis on remplit le réservoir de mercure à 0^0, et on pèse de nouveau (1). L'accroissement de masse M est la masse du mercure qui remplit le réservoir à 0^0. En désignant par D_0 la densité du mercure à 0^0, on a : $\frac{M}{D_0} = R_0$.

On obtient v_0 en ajoutant du mercure qui remplit à 0^0 un nombre b de divisions ; soit m l'accroissement de masse : $\frac{m}{bD_0} = v_0$.

Dilatation de l'enveloppe. — Ayant introduit du mercure dans le thermomètre, on le porte dans la glace fondante, le mercure occupe alors un volume $R_0 + pv_0 = S_0$; on le porte ensuite dans un bain liquide à t^0 où le mercure monte de a divisions.

L'enveloppe s'est dilatée ; en admettant qu'elle se dilate comme si elle était pleine, chaque unité de volume de la capacité intérieure de l'enveloppe devient $1 + Kt$, où K est le coefficient de dilatation cubique du verre ; la capacité qui contient le mercure à t^0 s'exprime par : $(S_0 + av_0)(1 + Kt)$.

En écrivant que le volume $S_0(1 + \mu t)$ du mercure à t^0 est égal à la capacité qui le renferme, on a : $S_0(1 + \mu t) = (S_0 + av_0)(1 + Kt)$

$$\text{ou } S_0\mu t = S_0Kt + av_0(1 + Kt).$$

On pourra calculer Kt, puisque μt est connu.

Dilatation d'un liquide. — On opère, dans la même enveloppe (2), avec le liquide dont on cherche la dilatation ; S_0 et a prennent de nouvelles valeurs V_0 et n ; de là : $V_0(1 + \omega_t) = (V_0 + nv_0)(1 + Kt)$

$$\text{ou } V_0\omega_t = V_0Kt + nv_0(1 + Kt)$$

Kt étant connu, cette nouvelle équation donne la dilatation ω_t de l'unité de volume du liquide de 0^0 à t^0.

Dilatation apparente. — $V_0\omega_t$ est la dilatation absolue du volume V_0 du liquide, V_0Kt est la dilatation absolue du volume V_0 de l'enveloppe, $nv_0(1 + Kt)$ est le volume que le liquide gagne dans la tige en se dilatant ; nv_0 est la *dilatation apparente* du liquide (en négligeant nv_0Kt).

---

(1) Les pesées se font quand le thermomètre a repris la température ambiante.

(2) Le remplissage du thermomètre soit avec du mercure, soit avec un liquide, se fait par le procédé déjà décrit à propos de la construction du thermomètre à mercure.

Les différents accroissements sont visibles sur la figure (fig. 258), nv_0 est le volume BDEF. Le produit nv_0Kt, qui correspond à la capacité annulaire dont ABCD est la section, est négligeable, vu la petitesse des deux facteurs nv_0 et Kt; l'équation se réduit ainsi à

$$V_0\omega_t = V_0 Kt + nv_0;$$

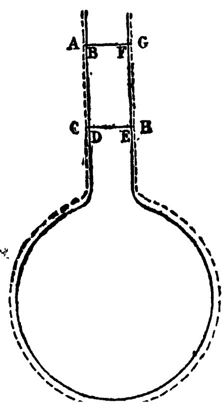


Fig. 258.

elle exprime que *la dilatation absolue d'un liquide est égale à la somme de sa dilatation apparente et de la dilatation de l'enveloppe* (1).

Cette écriture *ne modifie en rien* les opérations à effectuer, et la considération de la dilatation apparente n'est en aucune façon nécessaire.

Méthode du flacon. — On peut employer une enveloppe non graduée, par exemple un flacon à densité dont le tube capillaire porte un trait d'affleurement. On remplit le flacon de liquide jusqu'au trait à 0°, on chauffe à t^0, et on enlève le liquide qui dépasse le trait; M et M' étant les masses du liquide qui remplissent le flacon à 0° et t^0, on écrit que le volume du liquide dilaté qui remplit le flacon à t^0 est égal à la capacité qu'a prise l'enveloppe, à cette même température :

$$\frac{M'}{D_0}(1+\omega) = \frac{M}{D_0}(1+Kt).$$

On opérera, dans le même flacon, d'abord avec du mercure pour déterminer Kt, puis avec un liquide pour obtenir sa dilatation ω_t.

Résultats. — La dilatation des liquides est *très supérieure* à celle des solides. Elle peut être représentée par une expression à trois termes $\omega_t = at + bt^2 + ct^3$. Le coefficient moyen de dilatation entre 0° et t^0, $\frac{\omega_t}{t} = a + bt + ct^2$, croît avec la température. *Les liquides n'ont donc pas,* à proprement parler, *de coefficient de dilatation.* On détermine les constantes numériques a, b, c, par trois expériences effectuées, par exemple, de 0° à t^0, de 0° à t'^0, de 0° à t''^0. Le volume V_t d'un liquide à t^0 est représenté par :

$$V_t = V_0(1+\omega_t) = V_0(1 + at + bt^2 + ct^3)\ (2).$$

Pour des liquides pris à des températures supérieures à leurs points d'ébullition sous la pression atmosphérique, comme l'anhydride sulfureux liquide, le coefficient de dilatation croît très vite avec la température (3).

(1) Divisons par V_0; on a $\omega_t = Kt + \frac{nv_0}{V_0}$; si, d'après le jaugeage, $V_0 = Nv_0$, on a $\omega' = Kt + \frac{n}{N}$; la dilatation apparente de l'unité de volume du liquide est $\frac{n}{N}$.

(2) Exemple : *Alcool;* $\omega_t = 0{,}0010486t + 0{,}0000017510t^2 + 0{,}00000000134518t^3$.

(3) Pour suivre la dilatation d'un liquide à une température supérieure à son point

DILATATION DE L'EAU

216. Maximum de densité de l'eau. — Habituellement, le volume d'un liquide diminue constamment quand on le refroidit. L'eau présente une anomalie spéciale. Au-dessous de 4°, elle se dilate au lieu de continuer à se contracter comme un liquide quelconque. A 4°, *le volume d'une masse d'eau déterminée est minimum et sa densité est maximum*. L'enveloppe ne permet d'observer directement qu'un minimum de volume *apparent*. Si l'on refroidit simultanément, à partir de 15° environ, un thermomètre à mercure et un tube thermométrique contenant de l'eau, les niveaux baissent d'abord à la fois dans les deux tubes. Lorsque le thermomètre à mercure est voisin de 5°, le niveau paraît *stationnaire* dans le thermomètre à eau. Si l'on poursuit le refroidissement, le niveau de l'eau remonte, celui du mercure continue à baisser. *Le volume apparent de l'eau dans une enveloppe de verre est donc minimum vers* 5°.

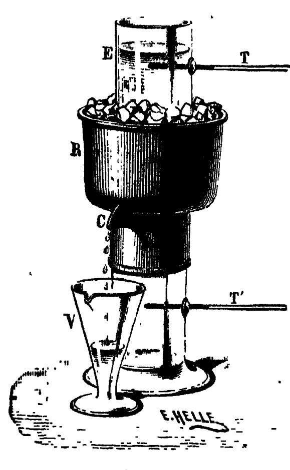


Fig. 259.

On rend manifeste le *maximum vrai de densité* de l'eau à 4°, par une méthode indépendante de la dilatation de l'enveloppe, en prenant une éprouvette E renfermant de l'eau et entourée, dans sa région moyenne, par une galerie métallique R remplie de fragments de glace (fig. 259). Les parois de l'éprouvette sont traversées par deux thermomètres à mercure T et T', placés l'un à la partie supérieure et l'autre vers le fond. L'eau de l'éprouvette se refroidit à la région moyenne et les deux thermomètres descendent; le thermomètre inférieur baisse plus vite, car l'eau refroidie au voisinage de la galerie est plus dense et tombe au fond. Le thermomètre inférieur *s'arrête* à 4°, tandis que le thermomètre supérieur, après avoir atteint à son tour 4°, continue à baisser. En effet, à partir du moment où toute l'eau de l'éprouvette

d'ébullition (sous la pression atmosphérique), on l'enferme, pour l'empêcher de bouillir, dans un tube de verre scellé où il est soumis à la pression de sa vapeur saturante. Ainsi surchauffé, le liquide offre une dilatation qui croît rapidement et, vers le point critique, son coefficient de dilatation peut dépasser notablement le coefficient de dilatation d'un gaz.

est à 4^0, les couches moyennes continuent à se refroidir au-dessous de 4^0; mais, plus légères, elles gagnent la partie supérieure.

En hiver, le refroidissement de l'eau des lacs, des étangs, des fleuves, a lieu par la surface; l'eau refroidie tombe au fond, et l'eau du fond remonte. Lorsque toute la masse a atteint 4^0, la température se maintient à 4^0 dans la profondeur et la vie y persiste alors même que la surface se congèle.

Détermination précise du maximum de densité de l'eau. — On fait usage d'un thermomètre à tige et on tient compte de la dilatation de l'enveloppe.

On introduit du mercure dans un thermomètre préalablement jaugé (**215**). Le mercure occupe à 0^0 un volume S_0; à t^0, son volume est $(S_0 + av_0)(1 + Kt)$; une lecture a donné un nombre a de divisions. Le volume du mercure à t^0 étant égal à la capacité qu'il occupe :

$$S_0 (1 + \mu_t) = (S_0 + av_0)(1 + Kt).$$

On déduit Kt de cette équation.

On remplit ensuite d'eau le même thermomètre. Soit V_0 le volume de l'eau à 0^0, n le nombre de divisions dont le liquide s'est élevé à t^0; L'expression : $(V_0 + nv_0)(1 + Kt)$, où l'on a remplacé K par sa valeur déterminée précédemment, est le volume V_t de l'eau à t^0, il est trouvé minimum à 4^0 (fig. 260).

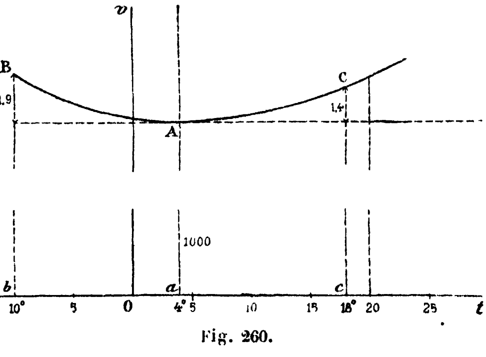


Fig. 260.

Le volume de l'eau est très sensiblement le même à 8^0 qu'à 0^0. Dans une enveloppe de verre, le volume *apparent* est à peu près le même à 0^0 et à 10^0. Entre 0^0 et 10^0, un même point d'affleurement d'une colonne d'eau dans un thermomètre à eau correspondrait donc à deux températures différentes.

L'observation des volumes V_4, V_t permet de calculer la densité de l'eau à t^0; en effet, la masse de l'eau renfermée dans l'enveloppe thermométrique étant constante :

$$V_4\, D_4 = V_t\, D_t, \text{ on en déduit } D_t = D_4 \frac{V_4}{D_t}.$$

Rappelons que la densité D_4 de l'eau à 4^0 est égale à 1.

DENSITÉS DE L'EAU ENTRE 0° ET 100°.

0°	0,999871	10°	0,999747
2°	0,999969	20°	0,998259
4°	1	30°	0,995765
6°	0,999970	50°	0,98820
8°	0,999886	100°	0,95865

En maintenant de l'eau liquide *par surfusion* dans un thermomètre jusqu'aux environs de — 20°, on a pu constater que l'eau continue à se dilater au-dessous de 0° (1).

Les dissolutions salines aqueuses offrent un maximum de densité. Ce maximum s'abaisse plus vite que le point de congélation; l'eau de mer a son maximum de densité à — 3°,7, elle se congèle à — 1°,9.

Par la pression, la température du maximum de densité de l'eau s'abaisse; l'abaissement est de 1° par 50 atmosphères.

APPLICATIONS DES DILATATIONS

217. Réduction des hauteurs barométriques. — *Correction relative à l'échelle.* — Le nombre N, lu sur l'échelle métallique d'un baromètre (ou d'un cathétomètre), n'est la hauteur de la colonne soulevée que si les divisions sont des centimètres à la température t de l'observation; si chaque division vaut 1 centimètre à zéro, et $1 + \lambda t$ à t^0 (λ coefficient de dilatation linéaire du laiton); la hauteur observée vaut $N(1 + \lambda t)$ centimètres.

La hauteur, corrigée de la dépression capillaire ε, est :

$$H = (N + \varepsilon)(1 + \lambda t).$$

Pression atmosphérique en dynes. — Soient D_0 la densité 13,59 du mercure à 0°, D sa densité à t^0, μ le coefficient de dilatation du mercure, la masse de la colonne de mercure, par centimètre carré de section, est :

$$HD = H\frac{D_0}{1 + \mu t}.$$

g étant l'intensité de la pesanteur au lieu de l'observation, le poids de la colonne en dynes ou la pression est HDg; à Paris, c'est $H\frac{D_0}{1 + \mu t}981$.

Hauteur de mercure normal. — Habituellement on note simplement des hauteurs de mercure. Le rapport des pressions, à di-

(1) La glace se contracte au-dessous de 0°.

verses températures et *dans diverses localités*, est le rapport des hauteurs de mercure équivalentes, qu'on évalue avec un ***mercure normal de poids spécifique constant***. Le *mercure normal* est du mercure pur à 0^0, au niveau de la mer et à la latitude 45^0.

Appelons g l'intensité de la pesanteur au lieu de l'observation (latitude λ, altitude z), G l'intensité de la pesanteur à 45^0 et à l'altitude 0; la pression qui fait équilibre, soit à une hauteur H de mercure, de poids spécifique Dg, au lieu de l'observation, soit à une hauteur H_0 de mercure normal, de poids spécifique D_0G, s'exprime par : $HDg = H_0D_0G$. Le rayon de la Terre étant R, on a :

$$H_0 = H \frac{D}{D_0} \cdot \frac{g}{G} = H \frac{1}{1 + \mu t} (1 - 0{,}00255 \cos 2\lambda) \left(1 - \frac{2z}{R}\right).$$

Pour rendre comparables des mesures barométriques ou manométriques **effectuées en un même lieu,** g ne variant pas, il suffit de faire les corrections de température et de capillarité;

$$H_0 = H \frac{D}{D_0} = \frac{(N + \varepsilon)(1 + \lambda t)}{1 + \mu t}.$$

218. Corrections des densités. — La *précision de la méthode du flacon* n'étant limitée que par la sensibilité de la balance, il convient de tenir compte, dans les pesées, de la poussée de l'air et de la température.

Dans une pesée, l'effort exercé par un corps dans l'un des plateaux de la balance fait équilibre à l'effort de la tare dans l'autre plateau. Nous supprimerons dans les équations : le facteur g commun aux deux membres, les facteurs l et l' qui représentent les longueurs des bras de levier du fléau et qui disparaissent par division.

Nous ne ferons qu'une tare et nous opérerons à charge constante.

Solides. — Appelons V_0 le volume du corps à 0_0, d_0 sa densité, e_0 la densité de l'eau à 0^0, δ la densité des poids, a la densité de l'air dans les conditions de l'expérience, t la température de la balance, K le coefficient de dilatation du corps, F le poids en grammes du flacon rempli et *plongé dans l'air*, M, M', etc..., les poids marqués (**122**).

Premier équilibre $\quad F + V_0d_0 - V_0(1 + Kt)\,a = \text{Tare}.$

Deuxième équilibre $\quad F + M\left(1 - \frac{a}{\delta}\right) = \text{Tare}.$

Troisième équilibre $\quad F - V_0e_0 + V_0d_0 + M''\left(1 - \frac{a}{\delta}\right) = \text{Tare}.$

Retranchons la deuxième équation de la première, puis la troisième de la première :

$$V_0d_0 - V_0(1 + Kt)\,a = M\left(1 - \frac{a}{\delta}\right)$$

$$V_0e_0 - V_0(1 + Kt)\,a = M''\left(1 - \frac{a}{\delta}\right)$$

Divisons :

$$\frac{d_0 - a\,(1 + Kt)}{e_0 - a\,(1 + Kt)} = \frac{M}{M''},$$

$$\text{d'où } d_0 = \frac{M}{M''}\,e_0 + a\,(1 + Kt)\left(1 - \frac{M}{M''}\right).$$

Liquides. — On a taré à la fois le flacon vide et un poids M_2 supérieur au poids du plus lourd des deux liquides. F est ici le poids en grammes, *dans l'air,* du flacon vide.

Premier équilibre $$F + M_2\left(1 - \frac{a}{\delta}\right) = \text{Tare}.$$

Deuxième équilibre $$F + V_0 d_0 - V_0\,(1 + Kt)a + M_1\left(1 - \frac{a}{\delta}\right) = \text{Tare}.$$

Troisième équilibre $$F + V_0 e_0 - V_0\,(1 + Kt)\,a + M'_1\left(1 - \frac{a}{\delta}\right) = \text{Tare}.$$

Retranchons la première équation de la deuxième, puis la troisième de la première, et, pour nous conformer aux notations antérieures (**122**), remplaçons $M_2 - M_1$ par M, et $M_2 - M'_1$ par M''.

$$V_0 d_0 - V_0\,(1 + Kt)\,a = M\left(1 - \frac{a}{\delta}\right.$$

$$V_0 e_0 - V_0\,(1 + Kt)\,a = M''\left(1 - \frac{a}{\delta}\right.$$

Divisons :

$$\frac{d_0 - a\,(1 + Kt)}{a\,(1 + Kt)} = \frac{M}{M''}$$

$$d_0 = \frac{M}{M''}\,e_0 + a\,(1 + Kt)\left(1 - \frac{M}{M''}\right).$$

219. Efforts exercés par des dilatations ou contractions. — L'effort avec lequel un corps solide ou liquide qu'on chauffe tend à augmenter de volume est extrêmement considérable ; il est égal à celui qu'il faudrait employer pour le comprimer d'une quantité égale à sa dilatation ; on peut en dire autant de l'effort exercé dans la contraction. On cite souvent l'exemple suivant : Les murs latéraux d'une galerie du Conservatoire des Arts et Métiers s'étaient écartés de la verticale sous le poids du plafond qu'ils soutenaient ; on fit tra-



Fig. 261.

verser, par des barres de fer, les murs dans leur partie élevée (fig. 261); les extrémités de ces barres étaient filetées et terminées au dehors par des écrous qui s'appuyaient sur des plaques de fonte embrassant de larges parties de la surface extérieure des murs. Chauffées sur toute leur longueur, les barres s'allongèrent, et les écrous furent serrés. Le retrait des barres par le refroidissement amena un redressement partiel des murs [1].

La figure 262 reproduit à peu près les conditions précédentes. L'extrémité filetée d'une barre métallique AB, comprise entre deux supports, est munie d'un écrou E que l'on serre au moment où l'on chauffe la barre; la contraction de la barre par refroidissement arrache les supports de leur plate-forme.

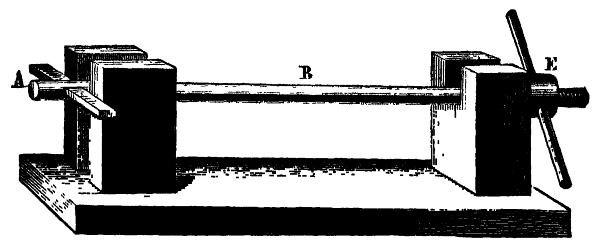


Fig. 262.

On utilise la dilatation pour l'ajustement des cercles d'acier des roues des voitures : le cercle ayant été préparé un peu trop étroit, on le chauffe, sa dilatation permet de le mettre en place sur la jante de la roue. La contraction consécutive assure son maintien.

Dans les ajustements où entrent des métaux soumis à des variations étendues de température, la disposition des pièces doit leur permettre de se dilater librement (barreaux des fenêtres grillées, lames de zinc des toitures, poutres des ponts métalliques, tuyaux métalliques qui s'emboîtent, rails de chemins de fer, etc.).

Les liquides étant aussi peu compressibles que les solides, leur dilatation exerce de même des efforts très puissants. Un tube de verre fermé aux deux bouts, à peu près plein de liquide, se brise par la pression due à la dilatation quand on le chauffe.

DILATATION DES GAZ

Les changements de dimensions, à l'air libre, des solides et des liquides sont dus aux seules variations de température, car les varia-

(1) Des alternatives d'échauffement et de refroidissement furent répétées jusqu'à ce qu'on eût ramené les deux murs à la verticale.

tions de la pression atmosphérique sont pratiquement sans influence. Pour les gaz, les variations de pression produisent des changements de volume comparables à ceux des variations de température.

Le volume d'un gaz devant être considéré comme dépendant de sa température et de sa pression, on cherche pour un gaz une relation entre son volume, sa température et sa pression et, pour cela, on fait l'étude d'un gaz dans trois conditions spéciales :

1° ***A température constante*** (volume et pression variables). On a la loi de Mariotte (**159**).

2° ***A pression constante*** (volume et température variables).

3° ***A volume constant*** (pression et température variables).

DILATATION D'UN GAZ SOUS PRESSION CONSTANTE

220. Relation entre les volumes et les températures. — Portons à t^0, sous une pression p, une masse de gaz de volume V_0 à 0^0 ; chaque unité de volume éprouvant une même dilatation a, l'accroissement de volume est $V_0 a$, proportionnel au volume initial. Le volume V du gaz dilaté a donc pour expression :

$$V = V_0 + V_0 a = V_0 (1 + a).$$

L'accroissement de volume est proportionnel à l'élévation de température mesurée avec un thermomètre normal, par suite $a = \alpha t$;

$$V = V_0 (1 + \alpha t).$$

α est l'accroissement de volume de l'unité de volume du gaz pour une élévation de température de 1^0, ou le *coefficient de dilatation sous pression constante;* $1 + \alpha t$ se nomme le *binôme de dilatation*.

Le volume V' du même gaz à t'^0 sous la même pression est :

$$V' = V_0 (1 + at').$$

Par suite $$\frac{V}{1 + \alpha t} = \frac{V'}{1 + \alpha t'} = V_0.$$

221. Relation entre les volumes, les températures et les pressions. — Soit une masse d'un gaz qui occupe un volume V à t^0, sous la pression p, puis un volume V' à t'^0, sous la pression p'.

Si de t et p, on ramène le gaz à 0^0 et p, son volume devient $\frac{V}{1 + \alpha t}$; si de t' et p', on le ramène à 0^0 et p', il prend un volume $\frac{V'}{1 + \alpha t'}$, car le *coefficient α est indépendant de la pression* sous laquelle la dilatation a lieu (pour des pressions qui ne sont pas trop différentes),

En appliquant la loi de Mariotte à ce gaz qui occupe, à une *même température*, un volume $\frac{V}{1+\alpha t}$ sous la pression p, puis un volume $\frac{V}{1+\alpha t'}$ sous la pression p', nous obtenons l'équation :

$$\frac{Vp}{1+\alpha t} = \frac{V'p'}{1+\alpha t'}.$$

Cette relation donne le volume V', à t' et p', d'une masse de gaz dont on connaît le volume V à t et p.

$\frac{Vp}{1+\alpha t}$ est le volume du gaz ramené à 0^0 et à l'unité de pression.

222. Calcul du volume d'un gaz dans les conditions normales. — Un gaz est dit dans les *conditions normales de température et de pression* quand sa température est 0^0 et que sa pression fait équilibre à 76 centimètres de mercure.

Soit une masse gazeuse de volume V à t^0, sous une pression H, calculons son volume V_0 à 0^0, sous la pression 76.

A 0^0 et à la pression de 1 centimètre, le volume est : $\frac{VH}{1+\alpha t}$;

à 0^0 et à la pression 76, il est : $V_0 = \frac{V}{1+\alpha t} \cdot \frac{H}{76}$.

223. Équation des gaz parfaits. — La relation :

$$\frac{Vp}{1+\alpha t} = \frac{V'p'}{1+\alpha t'} = V_0 p_0 \text{ [1]}.$$

où V_0 est le volume de la masse de gaz à 0^0 sous la pression p_0, exprime que, *sous pression constante*, les volumes d'un gaz sont proportionnels au binôme de dilatation : $V = V_0 (1 + \alpha t)$; c'est la ***loi de Gay-Lussac***. Elle exprime aussi que, *à température constante*, les volumes d'un gaz sont inversement proportionnels aux pressions : $Vp = V_0 p_0$; c'est la ***loi de Mariotte***.

Pour les gaz difficilement liquéfiables, le coefficient α est sensiblement le même (***loi de Charles***).

Un gaz qui suivrait rigoureusement les lois de Mariotte et de Gay-Lussac est dit **parfait**. Dans les circonstances ordinaires de température et de pression, l'oxygène, l'hydrogène, l'azote, l'air atmosphérique se comportent comme parfaits.

Dans les calculs usuels, on suppose les gaz parfaits. L'équation des gaz parfaits convient d'ailleurs pour de faibles variations.

L'équation des gaz parfaits s'écrit souvent

$$\frac{Vp}{\frac{1}{\alpha} + t} = \alpha V_0 p_0.$$

ou $Vp = RT$ (2) en posant $\alpha V_0 p_0 = R$ et $\frac{1}{\alpha} + t = T$; T s'appelle la *température absolue*, c'est la température comptée à partir de -273^0, car $\frac{1}{\alpha} = 273$.

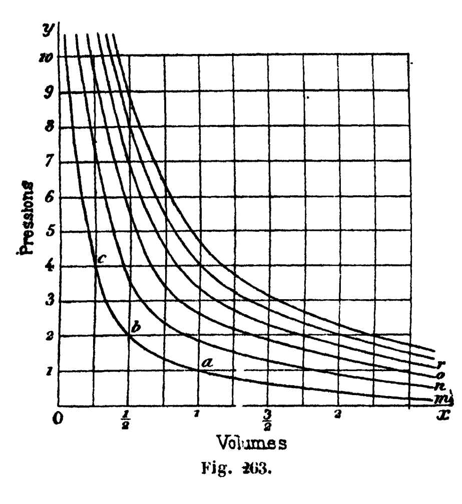


Fig. 263.

A une température déterminée, la relation $Vp = RT$ a pour représentation graphique une hyperbole équilatère ayant pour asymptotes les axes de coordonnées. La figure 263 représente un groupe d'hyperboles *m, n, o, r*, relatives à un même gaz, à *diverses températures;* ces courbes s'éloignent de l'origine des coordonnées à mesure que la température s'élève, elles sont dites *isothermiques.*

La relation $Vp = RT$ s'applique à une *masse quelconque* de gaz occupant un volume V à une température *t* et à une pression *p*.

Masses égales à un gramme. — Pour une masse de gaz de 1 gramme dont le volume v est le volume spécifique du gaz, l'équation s'écrit :

$$vp = \alpha v_0 p_0 T = \frac{\alpha p_0}{d_0} T = RT \text{ (1)};$$

v_0 et d_0 sont le volume spécifique et la densité du gaz à 0° et p_0; R a une valeur spéciale pour chaque gaz.

Avec l'air $\qquad R = \frac{\alpha p_0}{d_0} \text{ (2)} = \frac{1}{273} \cdot \frac{1033}{0,001293}.$

Masses équimoléculaires. — Si l'on prend une masse de chaque gaz égale à sa masse moléculaire M, le coefficient R prend une valeur R_1, *constante pour tous les gaz.* En effet, l'équation devient :

$$Mvp = \alpha M v_0 p_0 T = R_1 T$$

et, d'après la loi d'Avogadro (3), le *volume moléculaire* Mv_0 est le même pour tous les gaz. Calculons Mv_0 avec l'hydrogène :

---

(1) d_0 et d étant les densités d'un gaz à 0° et à t^0, $vd = v_0 d_0 = 1$; pour l'air, $d_0 = 0,001293$.

(2) p_0, exprimé en dynes, est égal à 1033.981.

(3) La loi d'Avogadro s'énonce comme il suit : Des volumes égaux de différents gaz, à la même température et à la même pression, renferment le même nombre de molécules ; il en résulte que le volume d'une molécule (volume de la masse moléculaire) est le même pour tous les gaz.

$$M = 2, \quad v_0 = \frac{1}{0{,}001293.0{,}0692}, \quad Mv_0 = 22330;$$

$$R_1 = \frac{1}{273} \cdot 1033.22330 = 84500$$

224. Équation des gaz réels. — Tous les gaz s'écartent plus ou moins de la relation $vp = $ R T. Van der Waals a proposé une équation qui convient, même au voisinage du point de liquéfaction, à un gaz dont on fait varier la pression, le volume et la température On l'écrit :

$$(v - a)\left(p + \frac{b}{v^2}\right) = RT;$$

les trois constantes a, b et R varient avec la nature du gaz ; a et b s'annulent pour un gaz parfait (1).

225. Extension à un mélange de gaz. — Plusieurs masses d'un même gaz (ou de gaz différents sans action mutuelle), occupent séparément un volume v à t et p, un volume v' à t' et p' ; les volumes des masses partielles ramenées à 0° et à la pression 1 seront :

$$\frac{vp}{1 + \alpha t}, \quad \frac{v'p'}{1 + \alpha t'} \ldots$$

le volume, à 0° et à la pression 1, de toutes ces masses sera la somme :

$$\frac{vp}{1 + \alpha t} + \frac{v'p'}{1 + \alpha t'} \ldots$$

Supposons la même masse totale comprenant : le premier gaz avec un volume v_1 à t_1 et p_1, le second avec un volume v'_1 à t'_1 et p'_1 etc., le volume total de toutes les masses ramenées à 0° et à la pression 1 sera :

$$\frac{v_1 p_1}{1 + \alpha t_1} + \frac{v'_1 p'_1}{1 + \alpha t'_1} \ldots$$

Le volume *total*, à 0° et à la pression 1, étant *invariable*, on a :

$$\sum \frac{vp}{1 + \alpha t} = \sum \frac{v_1 p_1}{1 + \alpha t_1}.$$

226. Décroissement de la densité. — Puisque le volume d'un gaz sous pression constante augmente avec la température, la masse de l'unité de volume diminue. Soit D_0 sa densité à 0°, D sa densité à t° ; la masse ne variant pas avec la température,

$$V_0 D_0 = V D; \quad \text{ou} \quad V_0 D_0 = V_0 (1 + \alpha t) D.$$

$$\text{On en déduit :} \quad D = \frac{D_0}{1 + \alpha t}.$$

---

(1) D'après l'équation (**2**), la pression augmentant indéfiniment à température constante, le volume d'un gaz tendrait vers zéro. Il tend, en réalité, vers un volume irréductible a, (*covolume*). On a d'abord substitué à $pv = $ RT l'équation $p(v - a) = $ RT. Cette équation donne : $p = $ RT $+ ap$, elle indique que le produit pv croît avec la pression ; elle convient à l'hydrogène, mais pas aux autres gaz. On a remarqué qu'il y a lieu de supposer des *forces de cohésion* qui agissent surtout quand le volume diminue et qui aident la pression extérieure à réduire le volume du gaz. Hirn a proposé l'équation $(p + \pi)(v - a) = $ RT ; π s'appelle *pression interne*. Van der Waals a posé $\pi = \frac{b}{v^2}$.

La diminution de densité d'un gaz qu'on échauffe explique l'élévation de la fumée qui est un gaz chaud noirci par de la poussière de charbon, l'ascension des montgolfières, le tirage des cheminées.

227. Relation entre les densités, les températures et les pressions. — Soit une masse de gaz de densité D à t et p, de densité D′ à t' et p', les densités de ce gaz ramené à 0° seront $D(1+\alpha t)$ sous la pression p, et $D'(1+\alpha t')$ sous la pression p'. D'après la loi de Mariotte : à une température constante, les densités d'un gaz sont *proportionnelles* aux pressions :

$$\frac{D(1+\alpha t)}{D'(1+\alpha t')} = \frac{p}{p'},$$

ou $$\frac{D(1+\alpha t)}{p} = \frac{D'(1+\alpha t')}{p'} = \frac{D_0}{p_0}.$$

Cette relation donne D′ à t' et p' si on connaît D à t et p.

ACCROISSEMENT DE PRESSION SOUS VOLUME CONSTANT

228. La force élastique d'un gaz chauffé de 0° à t^0 augmente seule si le volume V est maintenu *constant* (**200**).

Soit p_0 la force élastique à 0° *d'une masse de gaz* de volume V. L'accroissement de force élastique $p - p_0$, par l'échauffement, est proportionnel à la force élastique initiale et peut être représenté par $p_0 b$; pour l'hydrogène, on *admet* qu'il est proportionnel à l'élévation de température (d'après la définition du thermomètre normal); par conséquent $b = \beta t$ et $p - p_0 = p_0 \beta t$. *Pour les autres gaz,* on a aussi $b = \beta' t$ et, pour les gaz difficilement liquéfiables, β' est sensiblement le même que pour l'hydrogène.

β est le *coefficient d'augmentation de pression à volume constant* ou le centième de l'accroissement de force élastique, pour l'unité de force élastique, entre les deux points fixes de l'échelle centigrade.

La force élastique p du gaz, à t^0, est exprimée par : $p = p_0(1+\beta t)$.
A t'^0, la pression p' du gaz est : $p' = p_0(1+\beta t')$.

Par suite, $$\frac{p}{p'} = \frac{1+\beta t}{1+\beta t'}.$$

Sous un même volume, les pressions d'une masse de gaz aux températures t et t' sont donc proportionnelles au binôme $1+\beta t$.

229. Relation entre le volume, la température et la pression. — Soit une masse de gaz de volume V à t^0 et p; ramenons-la à 0° en la maintenant au volume V, sa pression devient $\frac{p}{1+\beta t}$; si cette *même masse*, de volume V′ à t' et p', est ramenée

à 0^0 sous le volume V', sa pression devient $\frac{p'}{1+\beta t'}$. Appliquons la loi de Mariotte à ce gaz ramené dans les deux cas à 0^0 :

$$\frac{Vp}{1+\beta t} = \frac{V'p'}{1+\beta t'} = V_0 p_0.$$

Chacun des deux membres représente la pression du gaz ramené à 0^0 sous l'unité de volume. En comparant à l'équation (1), on voit que $\beta = \alpha$. L'égalité est rigoureuse pour les gaz parfaits, la différence est très faible pour des gaz peu compressibles.

230. Extension à un mélange de gaz. — Soit une masse de gaz formée de plusieurs parties : l'une de volume v à t^0 et p, une autre de volume v' à t'^0 et p', etc. Ramenons-les séparément à 0^0 et au volume 1, les forces élastiques seront respectivement :

$$\frac{vp}{1+\beta t}, \frac{v'p'}{1+\beta t'}\cdots$$

la pression totale sera la somme : $\frac{vp}{1+\beta t} + \frac{v'p'}{1+\beta t'}\cdots$

Pour d'autres conditions des masses partielles, on a la somme :

$$\frac{v_1 p_1}{1+\beta t_1} + \frac{v'_1 p'_1}{1+\beta t'_1}\cdots$$

La pression totale à 0^0, sous l'unité de volume, étant invariable, on a :

$$\sum \frac{vp}{1+\beta t} = \sum \frac{v_1 p_1}{1+\beta t_1}.$$

MESURE DE LA DILATATION DES GAZ

231. Expériences de Gay-Lussac. — Gay-Lussac a mesuré l'accroissement de volume de l'unité de volume d'un gaz *sous pression constante*. Son appareil était un thermomètre A, à gros réservoir, muni d'une tige divisée en parties d'égale capacité.

Expérience. — On a rempli l'appareil d'air sec et on a introduit dans la tige un index de mercure *m* qui isole le gaz intérieur.

On place l'appareil dans une caisse E remplie de glace fondante et on dispose la tige horizontalement (fig. 264); le

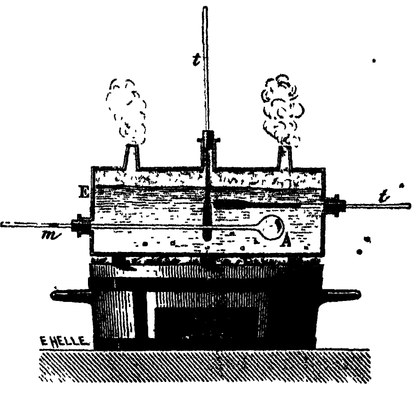


Fig. 264.

gaz se contracte et son volume se réduit à V_0, à la pression extérieure H.

La glace est remplacée par de l'eau que l'on chauffe graduellement jusqu'à l'ébullition; le gaz se dilate et déplace l'index de n divisions; la pression extérieure est H′ (peu différente de H). La température est marquée par des thermomètres t.

Calcul. — La tige étant ouverte à son extrémité, les variations de volume ont lieu sous la pression extérieure.

1° En négligeant la dilatation du verre et la variation de la pression extérieure, la dilatation de l'unité de volume serait $\frac{nv_0}{V_0}$, car nv_0 serait l'accroissement du volume du gaz.

2° En tenant compte de la dilatation du verre et en supposant la pression extérieure invariable, on écrit que le volume du gaz à 100° est égal à la capacité de l'enveloppe qui le renferme. Le volume apparent du gaz est $V_0 + nv_0$, son volume réel est $(V_0 + nv_0)(1 + kt)$, où k désigne le coefficient de dilatation cubique du verre; soit α_{100} l'accroissement de volume de l'unité de volume du gaz entre la glace fondante et l'eau bouillante :

$$V_0(1 + \alpha_{100}) = (V_0 + nv_0)(1 + 100k)$$

d'où
$$\alpha_{100} = \frac{(V_0 + nv_0)(1 + 100k) - V_0}{V_0}$$

3° Pour tenir compte de la dilatation du verre et de la variation de pression extérieure, on écrit, pour les deux phases de l'expérience, la constance de l'expression $\frac{VH}{1 + \alpha t}$ (**258**).

$$V_0 H = \frac{(V_0 + nv_0)(1 + 100k)}{1 + \alpha_{100}} H'.$$

$$\alpha_{100} = \frac{(V_0 + nv_0)(1 + 100k)\frac{H'}{H} - V_0}{V_0} = \left(1 + \frac{nv_0}{V_0}\right)\left(1 + 100k\right)\frac{H'}{H} - 1$$

On observe n, T, H et H′; il faut déterminer $\frac{v_0}{V_0}$ et k.

Jaugeage du thermomètre. — On détermine le rapport $\frac{v_0}{V_0}$ du volume d'une division au volume du réservoir jusqu'au zéro de la graduation, ces deux volumes étant pris à 0°.

A cet effet, l'appareil est pesé d'abord vide puis rempli de mercure à 0° jusqu'à l'origine des divisions; la différence des masses est M; on ajoute ensuite du mercure jusqu'à une division b à 0°; m est

l'accroissement de la masse; soit D_0 la densité du mercure à 0^0,

$$\frac{M}{D_0} = V_0, \quad \frac{m}{D_0} = bv_0, \quad \frac{v_0}{V_0} = \frac{m}{bM}.$$

Résultats. — Entre 0^0 et 100^0, la dilatation d'un gaz à pression constante est proportionnelle à la température.

Le coefficient $\frac{\alpha_{100}}{100}$ était le même pour les différents gaz.

Regnault a effectué avec précision (1) la détermination du coefficient de dilatation et du coefficient d'augmentation de pression des gaz.

232. Coefficient d'augmentation de pression sous volume constant. — *Description de l'appareil* (fig. 265). — Dans une étuve métallique, on place un ballon de verre à col effilé A, d'environ 1 litre de capacité,

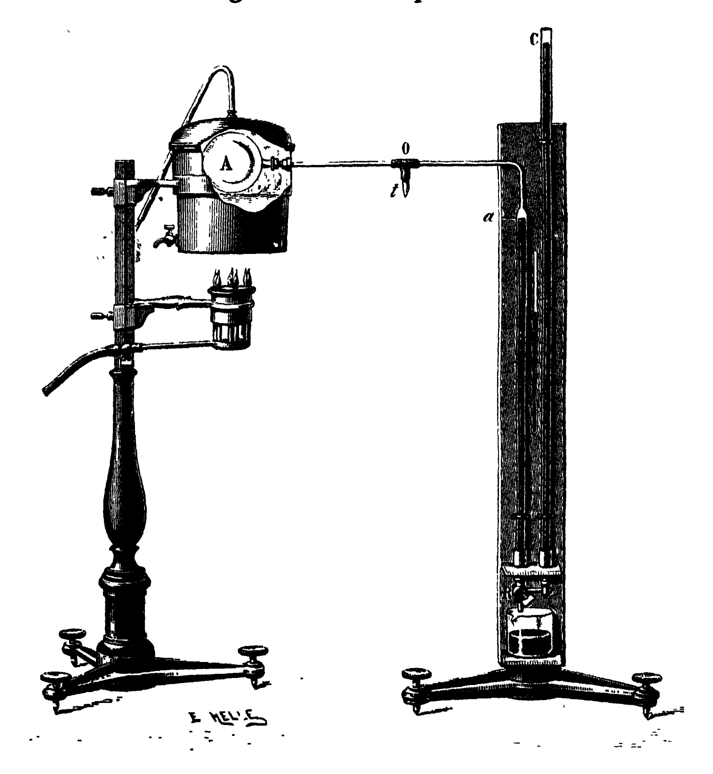


Fig. 265.

(1) Le coefficient trouvé par Gay-Lussac 0,00375 était trop fort, cela provenait surtout de ce que la vapeur d'eau condensée à la température ordinaire sur les parois intérieures du verre ne se dégage que très imparfaitement quand on a fait le vide à la température ordinaire, elle se dégage plus complètement quand on chauffe; en se joignant au gaz dans la deuxième partie de l'expérience, elle augmentait l'accroissement de volume.

qui communique avec un manomètre à air libre. Les deux branches du manomètre sont reliées par une pièce de fer munie d'un robinet à trois voies R (fig. 266). Le tube qui va du ballon au manomètre est un tube capillaire en deux parties raccordées par une tubulure métallique *o* à trois branches. Dans la troisième branche est mastiqué un tube de verre *t* qui relie l'appareil, par des tubes desséchants, soit avec une machine pneumatique, soit avec un réservoir à gaz.

Remplissage du ballon. — Ayant versé du mercure dans le manomètre, on tourne le robinet R, de façon à intercepter la communication entre les deux branches. Puis, l'étuve étant remplie d'eau bouillante, on fait le vide dans le ballon par le tube *t* et on laisse rentrer du gaz sec (1).

Première phase de l'expérience. *Gaz à* 0^0. — On entoure le ballon de glace fondante et on maintient sa communication avec le réservoir à gaz.

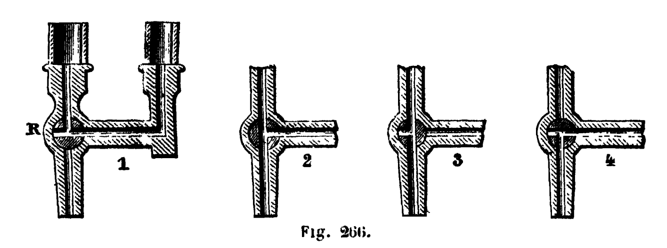


Fig. 266.

Le gaz du ballon se contracte, il en pénètre une nouvelle quantité qui a traversé les tubes desséchants. Le robinet R ayant été tourné de façon à faire communiquer entre elles les deux branches du manomètre (position 1, fig. 266), on verse du mercure dans le manomètre jusqu'à ce que le niveau atteigne un repère *a* très voisin du tube capillaire. Le niveau est le même dans les deux branches, car la pression dans le réservoir est la pression extérieure. On fond à la lampe l'extrémité du tube de verre *t*.

Le gaz ainsi isolé est à la pression extérieure H, il occupe le volume V_0 du ballon à zéro et le *petit* volume v compris entre la sortie du ballon et le trait *a*; le volume v est à la température ambiante θ.

Deuxième phase de l'expérience. *Gaz à* 100^0. — On remplace, dans l'étuve, la glace par de l'eau que l'on chauffe jusqu'à l'ébullition. En se dilatant, le gaz refoule le mercure du manomètre. En versant du mercure par la branche ouverte du manomètre, on ramène le niveau au trait *a*. La différence h des niveaux dans les deux branches, à la température T de la vapeur d'eau bouillante, se mesure au cathétomètre.

La masse gazeuse occupe maintenant, sous la pression $H + h$, les volumes $V_0\,(1 + KT)$ à T et v à θ (2).

Calcul. — Dans la *première phase*, le gaz du ballon de volume V_0 est à 0^0, le volume additionnel v, ramené à zéro, sans changement de pression, devient $\frac{v}{1+\alpha\theta}$, le volume total à 0^0 est $V_0 + \frac{v}{1+\alpha\theta}$ sous la pression H.

(1) La double opération du vide et de la rentrée du gaz dans le ballon chauffé est répétée plusieurs fois, pour entraîner l'eau condensée sur le verre.

(2) On ramène comme à l'ordinaire les hauteurs H et h à zéro.

Dans la *deuxième phase,* le gaz du ballon est à T°, le volume additionnel v, porté à T^0 sans changement de pression, devient $\frac{v(1+\alpha T)}{1+\alpha\theta}$; le gaz total, à T^0, aura un volume $V_0(1+KT)+\frac{v(1+\alpha T)}{1+\alpha\theta}$ à la pression $H+h$. Le gaz total ramené à 0^0, sans changement de volume, a une force élastique $\frac{H+h}{1+\beta_T}$.

Au gaz ramené à 0^0 dans les deux cas, on applique la loi de Mariotte en multipliant les volumes par les pressions correspondantes :

$$\left(V_0+\frac{v}{1-\alpha\theta}\right)H=\left[V_0(1+KT)+\frac{v(1+\alpha T)}{1+\alpha\theta}\right]\frac{H+h}{1+\beta_T}$$

Dans les parenthèses, les termes en α ont peu d'importance à cause de la petitesse de v on y remplace α par une valeur approchée, telle que celle de Gay-Lussac. On résoud ensuite l'équation par rapport à $1+\beta_T$.

La variation de pression, dans un même intervalle de température, est indépendante de la masse du gaz.

233. Coefficient de dilatation sous pression constante (fig. 267).

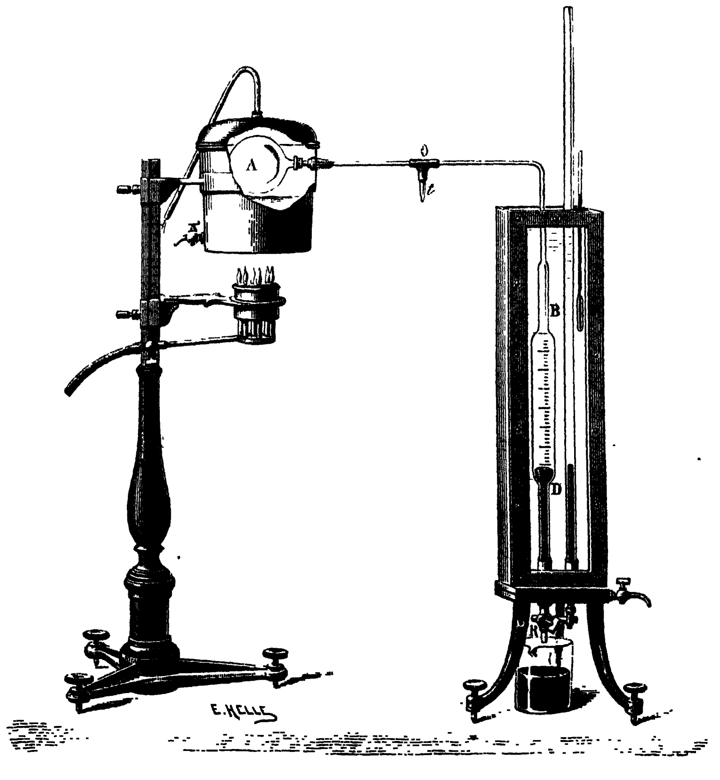


Fig. 267.

Le tube BD du manomètre a été divisé en parties d'égale capacité ; le manomètre est placé dans un bain d'eau de température connue.

La ***première phase de l'expérience*** est la même que dans la détermination précédente. Le ballon A est entouré de glace fondante et rempli de gaz sec. Les niveaux du mercure sont amenés sur un même plan horizontal dans les deux branches, à la partie supérieure du renflement BD.

Dans la ***deuxième phase de l'expérience,*** à T°, on laisse le gaz se dilater *librement* sous la pression atmosphérique. Pour cela on fait écouler du mercure par le robinet à trois voies R, afin que le niveau reste sensiblement le même dans les deux branches. Le gaz dilaté remplit un volume u, à la température τ, dans la courte branche BD du manomètre.

La force élastique H dans la glace et la force élastique H′ dans la vapeur d'eau bouillante sont très voisines de la pression atmosphérique.

Calcul. — Dans la *première phase,* la masse du gaz occupe sous la pression H un volume V_0 à 0° et un volume v à θ°; la masse totale ramenée à 0°, sous la pression H, occuperait un volume $V_0 + \frac{v}{1+\alpha\theta}$.

Dans la *deuxième phase,* sous la pression H′, la même masse occupe $V_0(1 + KT)$ à T°, v à θ et u à τ. La masse totale ramenée à 0° sous la pression H′ aura un volume

$$\frac{V_0(1+KT)}{1+\alpha_T} + \frac{v}{1+\alpha\theta} + \frac{u}{1+\alpha\tau}.$$

Nous appliquons la loi de Mariotte au gaz ramené à 0° dans les deux cas, en multipliant les volumes par les pressions correspondantes :

$$\left(V_0 + \frac{v}{1+\alpha\theta}\right) H = \left[\frac{V_0(1+KT)}{1+\alpha_T} + \frac{v}{1+\alpha\theta} + \frac{u}{1+\alpha\tau}\right] H'.$$

On remplace α par la valeur trouvée par Gay-Lussac dans $\alpha\theta$, $\alpha\tau$ et on résoud l'équation par rapport à $1 + \alpha_T$.

234. Résultats. — La variation de force élastique d'un gaz entre 0° et 100° est la même pour des gaz difficilement liquéfiables : air, azote, hydrogène.

Si l'on définit la température par la variation de force élastique de l'hydrogène, on a *par définition* pour l'hydrogène :

$$\beta_T = \beta T, \quad \beta = \frac{\beta_{100}}{100}.$$

Pour les gaz difficilement liquéfiables, on trouve $\beta_T = \beta T$;

Pour les mêmes gaz, la dilatation sous pression constante est proportionnelle à la température du thermomètre normal ; on peut donc écrire $\alpha_T = \alpha T$,

en outre, $$\alpha = \beta = 0{,}00367 = \frac{1}{273}.$$

α conserve la même valeur sous une pression un peu supérieure à la pression atmosphérique, par exemple à 2 ou 3 atmosphères ; il

en est de même pour β si la pression initiale du gaz est supérieure à la pression atmosphérique.

Pour les gaz facilement liquéfiables, tels que l'acide carbonique, l'acide sulfureux, α et β sont plus grands que pour l'air et croissent avec la pression. Enfin, pour ces gaz, α est un peu supérieur à β.

235. Appareil de démonstration. — Les expériences de Regnault peuvent être répétées rapidement avec un appareil analogue à celui qui a servi à vérifier la loi de Mariotte (**160**). La différence des niveaux du mercure entre le repère a et la surface du réservoir mobile C est mesurée sur une règle divisée verticale (fig. 268).

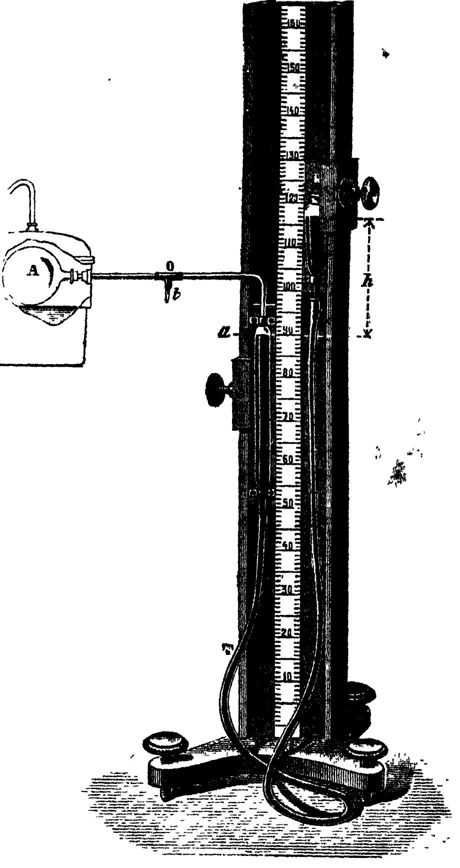


Fig. 268.

S'il s'agit du coefficient d'augmentation de pression, on place d'abord le ballon A dans la glace fondante ; on abaisse la cuvette C et on amène le niveau du mercure en a. On isole le gaz, qui est à la pression atmosphérique, en fermant à la lampe le tube t. On lit la hauteur barométrique H.

On place ensuite le ballon dans la vapeur d'eau bouillante. La pression du gaz augmente et le mercure tend à s'abaisser au-dessous de a. En soulevant le réservoir C, on maintient le niveau en a. En ajoutant à la pression barométrique la différence h des niveaux entre a et C, on a la pression du gaz à 100°.

L'accroissement de volume du ballon de 0° à 100° et le volume du

tube capillaire compris entre le ballon et le repère *a* étant très petits, on a sensiblement : $H + h = H(1 + \beta T)$.

THERMOMÈTRE NORMAL

236. Comparabilité des thermomètres à liquide. — Des thermomètres à mercure de dimensions différentes, construits avec des enveloppes du même verre donnent des indications identiques.

Deux thermomètres à mercure construits avec des verres différents s'accordent nécessairement, d'après leur graduation, à 0° et à 100° ; l'accord reste très approché entre 0° et 100°, mais les écarts peuvent devenir importants au-dessus de 100°.

237. Comparabilité des thermomètres à gaz. — Des thermomètres à gaz s'accorderaient plus complètement entre eux que des thermomètres à mercure si l'on déterminait les températures par les dilatations apparentes d'un gaz dans le verre, sous pression constante. Les *différences de dilatation* des verres n'exerceraient en effet qu'une influence minime, car un gaz se dilate environ 150 fois plus, et le mercure seulement 7 fois plus que le verre.

Thermomètre à gaz sous pression constante. — En admettant que les variations du volume d'une masse gazeuse *sous pression constante* sont proportionnelles aux variations de température, on poserait :

$$t = \frac{v - v_0}{\dfrac{v_{100} - v_0}{100}} = \frac{v - v_0}{a}$$

v_0 est le volume d'une masse d'air contenue dans un thermomètre à la température de la glace fondante, v son volume à la température t, a est la capacité d'un degré.

Une élévation de température de 1° est ici celle qui produit sur une masse d'air, à pression constante, un accroissement de volume égal à la centième partie de sa variation entre la glace fondante et la vapeur d'eau bouillante.

Dans la disposition du thermomètre à air sous pression constante (fig. 267), le gaz, après sa dilatation, n'est pas maintenu tout entier à la température à mesurer; aussi, la masse qui se dilate décroît constamment, et la *sensibilité du thermomètre diminue* quand la température s'élève.

On préfère, pour cela, mesurer une température par la variation de force élastique d'un gaz *à volume constant*. D'ailleurs, une pression, mesurée avec un cathétomètre, est obtenue plus exactement qu'un volume.

238. Thermomètre normal. — Une masse d'hydrogène est renfermée dans une enveloppe à 0° où elle occupe un volume déterminé, sous une pression égale à 1 mètre de mercure.

On porte l'appareil dans des enceintes à diverses températures, et on maintient le volume constant en faisant varier la pression.

On admet qu'à des variations égales de force élastique correspondent des variations égales de température et la température est définie par l'équation :

$$t = \frac{p - p_0}{\frac{p_{100} - p_0}{100}} \text{ (1)}$$

Un degré de température est ici une élévation de température qui produit sur une masse d'hydrogène, qui a dans la glace fondante une pression de 1 mètre de mercure, et dont le volume est maintenu constant, une variation de pression égale à la centième partie de la variation de pression entre la température de la glace fondante et la température de la vapeur d'eau bouillante.

Avec l'appareil employé (fig. 265 ou 268), l'équation thermométrique est un peu plus compliquée, car l'enveloppe se dilate; en outre, entre le ballon et le manomètre se trouve un volume v de gaz non chauffé. On écrit :

$$\left(V_0 + \frac{v}{1 + \alpha\theta}\right) p_0 = \left[V_0 (1 + KT) + \frac{v (1 + \alpha T)}{1 + \alpha\theta}\right] \frac{p_T}{1 + \beta T}.$$

On remplace α et β par 0,00367, et on résoud par rapport à T.

L'échelle des températures est indéfinie aux températures croissantes, car on ne connaît pas les limites de la dilatation d'un gaz. Aux températures décroissantes, on ne dépasserait pas $t = -273^0$, d'après l'expression $p = p_0 (1 + \beta t) = p_0 \left(1 + \frac{t}{273}\right)$.

Pratiquement, on remplace l'hydrogène par l'*azote* (également sous volume constant); car, aux températures élevées, l'hydrogène traverse l'enveloppe de platine qui contient le gaz.

DENSITÉ DES GAZ

239. Pour calculer la masse M d'un volume V de gaz, il faut connaître la densité ou la masse d'un centimètre cube de ce gaz.

La mesure de la densité ne se fait directement que pour l'air. Pour les autres gaz, on mesure la *densité par rapport à l'air.*

On appelle **densité d'un gaz par rapport à l'air,** *à t^0 et à la pression* H, *le rapport des masses ou, en un même lieu, le rap-*

(1) En posant $\frac{p_{100} - p_0}{100\, p_0} = \beta$, on a $t = \frac{p - p_0}{\beta\, p_0}$ et $p = p_0 (1 + \beta t)$ β est le coefficient d'augmentation de pression à volume constant.

port des poids, de volumes égaux de gaz et d'air pris à t^0 et H.

Calcul de la masse m d'un volume V d'air à t^0 et H. — Appelons a la densité de l'air à 0^0 et 76, V_0 le volume qu'une masse d'air m occupe à 0^0 et 76, on a : $m = V_0 a$,

or $$V_0 = \frac{V}{1+\alpha t} \cdot \frac{H}{76}, \quad \text{donc} \quad m = \frac{V}{1+\alpha t} \cdot \frac{H}{76}\, a.$$

Calcul de la masse M d'un volume V de gaz à t^0 et H. — Soit A la densité du gaz à 0^0 et 76, et V'_0 son volume à 0^0 et 76, on a $M = V'_0 A$.

Si le gaz suit, comme l'air, les lois de Mariotte et de Gay-Lussac et a le même coefficient de dilatation, $V'_0 = V_0$, donc $M = V_0 A$; de là, on déduit $\frac{M}{m} = \frac{A}{a} = d_0$, d_0 étant la densité du gaz *par rapport à l'air* à 0^0 et 76.

$$M = md_0 = V_0\, ad_0 = \frac{V}{1+\alpha t} \cdot \frac{H}{76} \cdot ad_0.$$

Une masse de gaz de volume V est donc égale au produit de la masse d'un même volume d'air, dans les mêmes conditions de température et de pression, par la densité du gaz par rapport à l'air.

Poids d'un volume V de gaz à t^0 et H. — En un lieu où l'intensité de la pesanteur est g, le poids du gaz sera :

$$P = Mg = \frac{V}{1+\alpha t} \cdot \frac{H}{76}\, ad_0 g.$$

On détermine une fois pour toutes d_0 et a.

En appelant A' et a' les densités du gaz et de l'air à t^0 et H,

$$m = Va', \ M = VA', \text{ d'où } \frac{M}{m} = \frac{A'}{a'}.$$

$\frac{A'}{a'}$ est la densité du gaz par rapport à l'air à t^0 et H.

Puisque, pour ces mêmes masses de gaz et d'air, à 0^0 et 76, nous avons $\frac{M}{m} = \frac{A}{a} = \frac{A'}{a'}$, *la densité, par rapport à l'air, d'un gaz qui suit les mêmes lois de dilatation et de compressibilité que l'air, est un nombre constant, indépendant de la température et de la pression.*

240. Mesure de la densité d'un gaz par rapport à l'air. — Pour obtenir la densité d'un gaz *par rapport à l'air*, on détermine la masse de gaz comprise dans un volume V, puis la masse d'air comprise dans le même volume à la même température et à la même pression. Regnault a fait cette détermination à 0^0 et 76.

Expérience de Regnault. — Ayant pris un ballon A, d'une dizaine de litres, on le fait communiquer par les robinets à trois voies R et

R' : 1° avec un manomètre barométrique ; 2° avec une machine pneumatique ; 3° avec un réservoir à gaz par l'intermédiaire de tubes desséchants. On dessèche le ballon, en y faisant le vide plusieurs fois et en laissant chaque fois rentrer du gaz sec.

On entoure ensuite le ballon de glace fondante en le laissant en communication avec le réservoir à gaz. Le ballon plein de gaz prend la température zéro, à la pression H du manomètre (fig. 269). On ferme le robinet *r* du ballon.

Le ballon est retiré de la glace ; quand il a repris la température

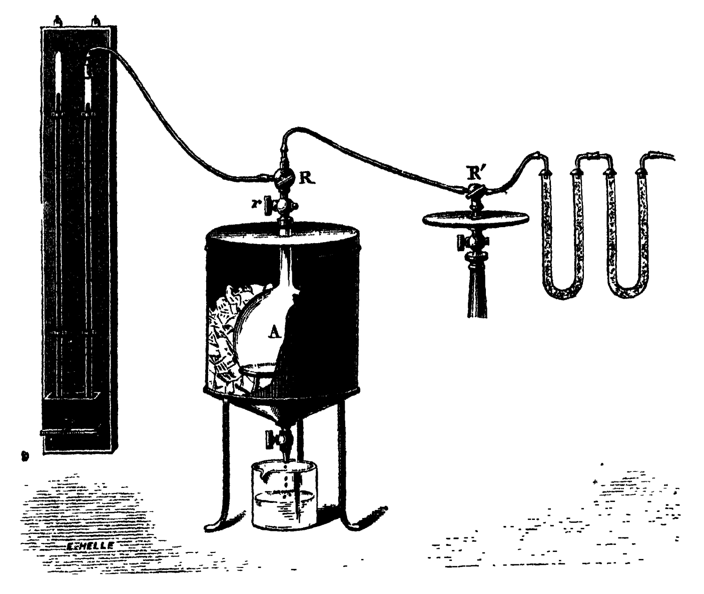


Fig. 269.

ambiante, on l'essuie et on le suspend au-dessous du plateau d'une balance, puis on fait la tare.

On le replace dans la glace et on raréfie le gaz avec une machine pneumatique. Quand le ballon est à 0°, la pression étant h au manomètre, on ferme *r*. Revenu à la température ambiante, le ballon est essuyé puis reporté sous le plateau de la balance.

Il faut ajouter M_1 grammes du côté du ballon pour rétablir l'équilibre, M_1 est la masse de gaz qui remplissait le ballon à la pression $H - h$ (1). La masse de gaz qui occuperait le volume du ballon sous

(1) En effet, d'après la loi du mélange des gaz, le mélange d'un volume V de pression h et d'un volume V de pression $H - h$ donne un volume V de pression H.

la pression 76 serait, d'après la loi de Mariotte (1) : $M_1 \frac{76}{H - h}$.

On répète ces opérations avec de l'air sec. La masse d'air qui occupe le ballon à 0° et à la pression 76 est : $m_1 \frac{76}{H' - h'}$; m_1 représente le nombre de grammes qu'il a fallu ajouter du côté du ballon pour remplacer l'air qui exerçait la pression $H' - h'$.

La densité du gaz *par rapport à l'air* à 0° et 76 est :

$$d_0 = \frac{M_1}{m_1} \cdot \frac{H' - h'}{H - h} \text{ (2)}.$$

Ballon compensateur. — Dans les deux équilibres consécutifs relatifs à un même gaz, nous avons admis que la poussée de l'air extérieur sur le ballon était constante. Mais, les opérations étant longues, la pression et la température varient d'un équilibre à l'autre. Regnault évita toute correction de la poussée de l'air en suspendant du côté de la tare un ballon de verre A' de même volume extérieur (3) et de même verre que le ballon à gaz A (fig. 270). De la sorte, un équilibre une fois établi dans la balance entre les deux ballons persistait indéfiniment, car la poussée restait la même sur les deux ballons, malgré les variations extérieures, et malgré des condensations d'humidité sur leur surface extérieure.

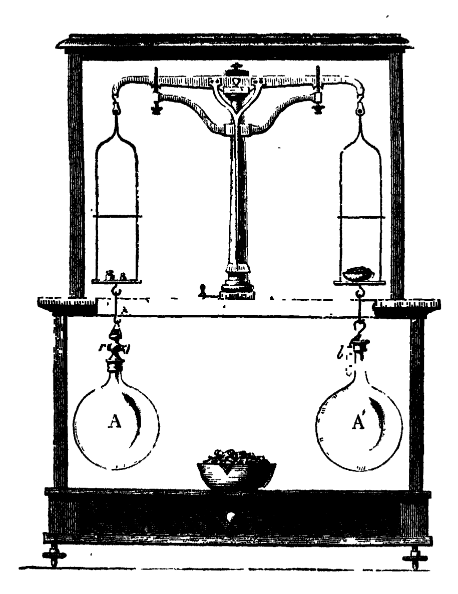


Fig. 270.

Avec une balance qui apprécie le dixième de milligramme (au lieu du milligramme), M. Leduc a réduit le volume du ballon à environ 2 litres. On peut alors faire le vide avec une machine pneumatique à mercure. Les pressions finales h et h' sont tellement faibles, ainsi que les masses de gaz résiduelles, qu'il n'y a pas d'erreur à laisser le ballon, dans l'air extérieur, à la température ambiante, quand on y fait le vide, au lieu de le porter dans la glace fondante.

(1) Proportionnalité des forces élastiques aux densités ou aux masses qui occupent un même volume.

(2) Les hauteurs $H' - h'$ et $H - h$ ont été ramenées à 0°.

(3) Les deux ballons doivent éprouver la même poussée quand on les plonge dans l'eau, s'ils ont le même volume extérieur. Si l'égalité n'est pas parfaite, on accroche au plus petit des deux un tube de verre b (fig. 270) dont le volume est égal à la différence,

241. Masse d'un centimètre cube d'air. — Pour calculer la masse d'un gaz d'après l'expression :

$$M = \frac{V}{1+\alpha t} \cdot \frac{H}{76}\, a d_0,$$

il faut connaître la masse a d'un centimètre cube d'air à 0° et à 76.

La masse d'air $V_0 a$ qui occupe un volume V_0 à 0° et 76 (**240**) est :

$$m_1 \frac{76}{H'-h'};$$

En divisant cette masse par V_0, on obtient a. Pour mesurer V_0, on remplit le ballon d'eau à 0°, on pèse cette eau, on divise son poids par e_0.

La masse d'un centimètre cube d'air à 0° et 76 est 0,001293.

242. Variations, avec la température et la pression, de la densité d'un gaz par rapport à l'air. — Soient M et m des masses de gaz et d'air qui occupent respectivement un même volume V_0 à 0° et 76 ; soient V et v les volumes occupés à t^0 et H par ces masses de gaz et d'air ; les densités du gaz par rapport à l'air, d_0 à 0° et 76, d à t^0 et H sont :

$$d_0 = \frac{M}{V_0} : \frac{m}{V_0}, \quad d = \frac{M}{V} : \frac{m}{v}; \quad \text{d'où } d = d_0 \frac{v}{V};$$

Si le gaz ne se dilate pas et ne se comprime pas comme l'air, sa densité par rapport à l'air varie avec la température et avec la pression.

Densités à température constante. — Si le gaz se comprime comme l'air, $VH = vH$; $V = v$ et $d = d_0$.

Si le gaz se comprime plus que l'air quand la pression est croissante, on a $VH < vH$, d'où $V < v$; d est supérieur à d_0 et croît avec H.

Densités à pression constante. — Si le gaz se dilate comme l'air ; $d = d_0$. Si le gaz se dilate davantage, d'après :

$$v = V_0 (1 + \alpha t) \text{ et } V = V_0 (1 + \alpha' t) \quad \text{où } \alpha' > \alpha;$$
$$\text{on a } V > v \text{ et } d \text{ est inférieur à } d_0.$$

Pour une température élevée et une pression réduite, le gaz suit les lois de dilatation et de compressibilité de l'air et sa densité devient constante.

DENSITÉS PAR RAPPORT A L'AIR.

	Densités.		Masses d'un centimètre cube à 0° et 76.
Oxygène	1,1052	1,1052 × 0,001293 =	0,00143
Azote	0,967		0,00125
Hydrogène	0,069		0,00009
Chlore	2,491		0,00322
Acide carbonique	1,529		0,00198
Ammoniaque	0,597		0,00076

FUSION

243. La *fusion est le passage d'un corps de l'état solide à l'état liquide sous l'action de la chaleur.*

Fusion brusque et fusion progressive. — Pour certains corps, comme la cire à cacheter, le verre, le suif, le fer, l'état solide se modifie progressivement : il y a d'abord *ramollissement*, puis passage à l'état de liquide visqueux et enfin de liquide fluide. La *fusion pâteuse* est utilisée pour le fer dans le travail de la forge; elle permet d'étirer le verre en fils et de le souffler.

Un grand nombre de corps, comme la glace, l'étain, le plomb, le soufre, passent de l'état solide à l'état liquide d'une façon brusque, ou dans un intervalle de température extrêmement petit.

Les lois de la fusion se rapportent à la fusion brusque.

244. Lois de la fusion. — 1° A une pression déterminée, *la fusion a toujours lieu à la même température pour un même corps pur.* Cette température est appelée **point de fusion**. Chaque substance a un point de fusion spécial et caractéristique.

2° *La température d'un corps en fusion demeure constante pendant la durée de la fusion;* c'est seulement lorsque toute la masse est devenue liquide, que sa température continue à s'élever. La fusion est plus rapide si la chaleur du foyer augmente.

Ces lois se vérifient à l'aide d'un thermomètre placé dans la substance en fusion. La constance de la température pendant la fusion de la glace a servi à caractériser le zéro de l'échelle centigrade.

POINTS DE FUSION

Mercure	—40°	Argent	960°
Glace	0°	Or	1060°
Étain	235°	Cuivre	1050°
Plomb	335°	Platine	1775°
Zinc	410°	Iridium	1950°

Corps réfractaires. — Tous les corps solides, non décomposables par la chaleur, peuvent être liquéfiés par des sources calorifiques suffisantes. Certains corps, considérés longtemps comme *réfractaires* ou infusibles, fondent à la température du chalumeau oxhydrique (2500°) ou à la température de l'arc voltaïque (3500°).

Corps décomposables. — Beaucoup de corps, comme le bois, sont décomposés par la chaleur, même à l'abri de l'air, avant d'être liqué-

fiés. Dans les fours à chaux, la craie ou carbonate de chaux ne fond pas, elle se décompose par la chaleur en acide carbonique qui se dégage et en chaux vive. Mais en chauffant fortement de la craie enfermée dans un canon de fusil hermétiquement clos, la décomposition *se limite* à une petite partie de la substance parce que l'acide carbonique ne peut se dégager; la température s'élève, la craie fond et par le refroidissement prend l'aspect du marbre.

Changement de volume pendant la fusion. — La plupart des corps se dilatent brusquement de B en C en fondant (fig. 271), leur densité diminue. La glace fait exception : l'eau à 0^0 est plus dense que la glace à 0^0. Il en est de même pour le bismuth, l'argent. Pour les corps à fusion progressive, l'augmentation de volume a lieu de *b* en *c*, dans un certain intervalle de température.

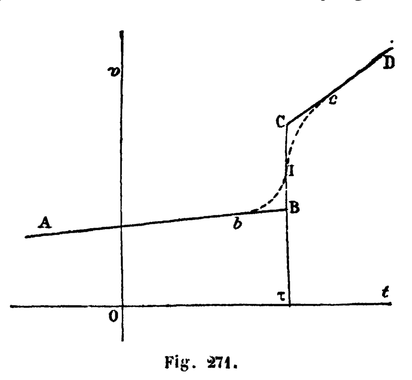


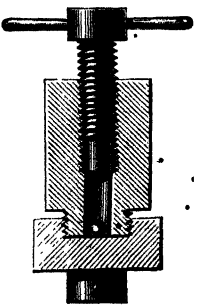
Fig. 271.

245. Variation du point de fusion avec la pression. — Si la fusion n'était accompagnée d'aucun changement de volume, la pression ne ferait pas varier le point de fusion.

Mais, si un corps se dilate en fondant, un accroissement de la pression extérieure s'oppose à la fusion, et élève le point de fusion; pour un corps qui se contracte en fondant, un accroissement de pression facilite la fusion et abaisse le point de fusion.

Sous une pression de 16 atmosphères, la glace fond à — $0^0,12$. Les variations habituelles de la pression sont trop faibles pour exercer une influence pratique sur le point de fusion, par exemple dans la détermination du zéro des thermomètres.

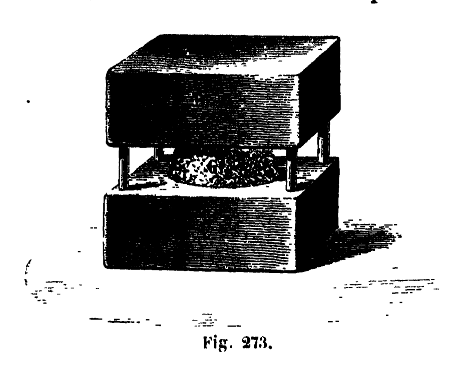
On constate l'abaissement du point de fusion de la glace par la pression, avec un tube d'acier à parois très résistantes, fermé inférieurement par un bouchon à vis et pouvant recevoir, à la partie supérieure, un piston plongeur également à vis (fig. 272). Le tube est rempli d'eau que l'on fait congeler dans un mélange réfrigérant; on pose sur le bloc de glace une boule métallique et on visse le piston; on l'enfonce ensuite graduellement, ce qui permet d'at-


Fig. 272.

teindre une pression de plusieurs milliers d'atmosphères. Si l'on dévisse ensuite le piston, l'eau redevient solide, mais on trouve, au fond du tube, la boule en contact avec le bouchon inférieur.

La pression a fait fondre la glace, la boule a traversé le liquide, l'eau s'est de nouveau congelée au moment de la décompression. On a pu ainsi faire fondre la glace au-dessous de — 20°.

Regel. — L'abaissement du point de fusion de la glace par la pression explique la plasticité de ce corps sous de fortes pressions. Si l'on comprime à la presse hydraulique des fragments de glace G serrés entre deux moules en bois dur (fig. 273), la pression détermine la fusion d'une petite quantité de glace sur les surfaces en contact, la température s'abaisse par suite de l'absorption de chaleur due à la fusion. Quand on cesse la pression, l'eau de fusion, dont la température est inférieure à 0°, se solidifie et réunit les fragments en une masse parfaitement limpide qui a la forme exacte du moule (fig. 274). Il y a eu fusion et regel. L'enfant qui pétrit une boule de neige répète l'expérience du regel.


Fig. 273.

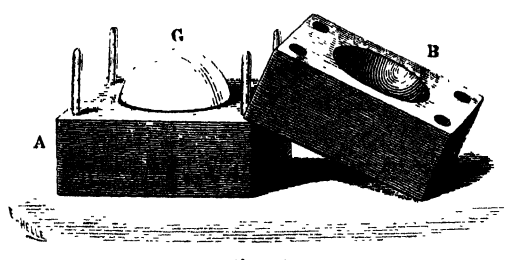


Fig. 274.

Les mouvements des glaciers ont été attribués à cette plasticité sous de fortes pressions.

SOLIDIFICATION

246. La *solidification,* phénomène inverse de la fusion, *est le passage de l'état liquide à l'état solide par refroidissement.* Suffisamment refroidis, tous les liquides se solidifient, l'eau à 0°, le mercure à — 40°, l'alcool à une température très basse.

Lois de la solidification. — Pour les substances qui fondent sans passer par un état pâteux :

1° *La température de solidification est la même que la température de fusion.* La glace fond à 0°, l'eau se congèle à 0°.

2° *Pendant toute la durée de la solidification, la température du mélange de solide et de liquide, reste invariable,* si intense que soit le refroidissement; elle ne continue à s'abaisser qu'après la solidification complète.

Changement de volume au moment de la solidification. — La plupart des substances *diminuent de volume* en se solidifiant et, par suite, augmentent de densité. Les fragments solidifiés s'enfoncent dans le liquide.

L'eau, le bismuth, l'argent, *augmentent de volume* en se solidifiant et flottent au-dessus du liquide au lieu de tomber au fond.

L'accroissement de volume de l'eau qui se solidifie (11 litres d'eau donnent 12 litres de glace) explique : les fissures des pierres gélives pendant l'hiver, les effets de la gelée sur les plantes (les

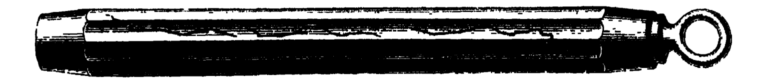


Fig. 275.

liquides congelés déchirant les tissus des végétaux); la rupture de tuyaux de conduite qu'on a laissés remplis d'eau et dont le contenu gèle en entier. Un tube d'acier plein d'eau et hermétiquement clos, est fendu par la congélation du contenu (fig. 275).

247. Chaleurs de fusion et de solidification. — La constance de la température pendant la fusion tient à ce que la chaleur fournie par le foyer en activité est employée à produire la fusion (1).

En se solidifiant, un liquide dégage de la chaleur; *la chaleur de solidification est égale à la chaleur de fusion.*

248. Équilibre de fusion. — Lorsqu'un mélange d'un solide et du liquide qui provient de sa fusion est maintenu à une température t rigoureusement constante, à la pression p qui est la pression de fusion à la température de l'expérience, les proportions relatives du solide et du liquide peuvent être quelconques et elles demeurent invariables, *en équilibre,* si les conditions de température et de pression ne changent pas. Tout le mélange passe à l'état solide si, *en maintenant la pression* p, on abaisse un tant soit peu la température; au contraire, tout devient

(1) La chaleur de fusion effectue des travaux mécaniques : 1° travail moléculaire interne; 2° travail externe de refoulement de la pression atmosphérique. L'accroissement de volume qui accompagne la fusion étant faible, ce travail externe est négligeable.

liquide, si on élève la température. Si, *en maintenant la température t,* on élève un tant soit peu la pression, tout le mélange passe à l'état solide; au contraire, tout devient liquide, si on abaisse la pression.

Ces variations, soit à pression, soit à température constante, se rapportent aux corps dont la pression élève le point de fusion. Pour les corps dont la pression abaisse le point de fusion, les variations sont inverses.

249. Surfusion. — La surfusion est un *retard à la solidification* pour un corps qui reste liquide à une température inférieure à son point de fusion. Avec des précautions spéciales, on peut refroidir de l'eau jusqu'à — 12° sans qu'elle se solidifie (1).

Le soufre fond et se solidifie à 111°; des globules de soufre fondu peuvent rester liquides jusqu'à la température ordinaire (2).

Le phosphore blanc fond à 44°2. Fondu dans un tube au-dessous d'une petite couche d'eau, il peut rester liquide jusqu'à 20°.

Solidification d'un liquide surfondu. — On produit sûrement la solidification d'un liquide surfondu en amenant au contact du liquide une *parcelle solide de la substance au même état moléculaire.* Le phosphore surfondu se solidifie au contact du phosphore blanc, un fragment de phosphore rouge est sans action. Une action mécanique, *choc, agitation,* détermine aussi la solidification.

La solidification d'un liquide en surfusion a lieu brusquement et avec dégagement de chaleur. Si la solidification n'est pas complète, la température remonte jusqu'au point de fusion.

En raison des phénomènes de surfusion, la température normale de solidification ou de fusion est la température *maximum* à laquelle un corps peut exister à l'état solide. Au dessus il est toujours liquide. Au dessous, il peut être solide ou liquide. Toutefois, si peu qu'on l'abaisse au-dessous de la température de fusion, une parcelle du solide provoque la solidification immédiate du liquide. Cette propriété est utilisée pour *déterminer exactement le point de fusion* d'une substance. Après l'avoir fait fondre en la chauffant un peu au-dessus du point de fusion, on la laisse se refroidir lentement et à mesure que le thermomètre descend, on y projette une parcelle du solide. La solidification n'a lieu que si la température est un tant soit peu inférieure à la température de fusion.

DISSOLUTION

250. La dissolution d'un corps solide dans un liquide est une

(1) Eau préservée de toute agitation, purgée d'air par ébullition, et protégée contre le contact de l'air par une couche d'huile. De l'eau placée dans un tube capillaire résiste facilement à la solidification.

(2) Par un refroidissement lent et sans agitation dans une dissolution de chlorure de zinc ayant la densité du soufre fondu.

liquéfaction qui a lieu à toute température. Un corps n'est habituellement soluble que dans certains liquides. Le sucre, très soluble dans l'eau, est insoluble dans l'alcool ; la graisse, insoluble dans l'eau, est soluble dans la benzine. Beaucoup de sels métalliques se dissolvent dans l'eau; l'alcool, l'éther, la benzine, l'acide acétique, l'acétone sont des dissolvants pour de nombreuses substances organiques.

On appelle *concentration* d'une solution la masse du corps dissoute par un gramme du dissolvant. La solution est dite *étendue* si la concentration est faible. Lorsque le dissolvant renferme le maximum de solide qu'il peut dissoudre, la solution est dite *saturée* et la concentration est maximum. Le ***coefficient de solubilité*** est la concentration maximum. Il croît habituellement avec la température (très peu pour une solution aqueuse de *chlorure de sodium*).

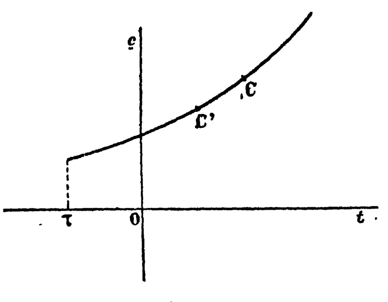


Fig. 276.

En portant en abscisses les températures et, en ordonnées les coefficients correspondants de solubilité, on trace la *courbe de solubilité* d'une substance (fig. 276). Le solide se précipite, par refroidissement, et la concentration maximum diminue, pour un parcours CC', sur la courbe de solubilité.

A une température suffisamment basse, avant que tout le solide se soit précipité, la solution se congèle brusquement. Cette température τ est appelée température *d'eutexie*.

251. Abaissement du point de congélation des dissolutions non saturées. — Le point de congélation d'un liquide pur est invariable. Si le liquide renferme un solide dissous, le point de congélation est inférieur à celui du liquide pur et son ***abaissement croît avec la concentration;*** la congélation donne des cristaux *du dissolvant pur*. Comme la concentration augmente à mesure que le dissolvant se sépare par congélation, le point de congélation s'abaisse de plus en plus (1).

(1) Le point exact de congélation d'une solution non saturée est observé à l'instant où les premiers cristaux se forment, car le solide obtenu étant *du dissolvant pur*, la concentration de la solution qui reste augmente et le point de congélation s'abaisse.

Pour éviter la surfusion, on plonge dans le liquide une parcelle du dissolvant congelé,

Dissolutions très étendues non électrolysables. — Pour une dissolution déterminée, très étendue, l'abaissement du point de congélation est *proportionnel à la concentration c*, ou à la masse dissoute dans un gramme du dissolvant.

A égalité de concentration, pour un même dissolvant, *l'abaissement s est en raison inverse de la masse moléculaire* M de la substance dissoute : $s = \frac{cK}{M}$; K est constant pour un dissolvant et varie avec le dissolvant. On en tire $\frac{sM}{c} = K$ (si l'on fait avec le même dissolvant des solutions étendues renfermant chacune la même fraction des masses moléculaires de différents corps solubles, la température de congélation est la même pour toutes ces solutions) [1]. L'abaissement s étant observé, la concentration étant connue, ainsi que le poids moléculaire d'une substance dissoute, on peut calculer K [2]. Pour l'eau $K = 1850$. Si, pour une substance de masse moléculaire inconnue M_1, l'abaissement est s_1 avec une concentration c_1 dans le même dissolvant, on a l'équation $\frac{s_1 M_1}{c_1} = K$ et on en déduit M_1.

La **méthode cryoscopique** *de détermination des masses moléculaires* est d'un emploi facile, mais comme les abaissements des points de congélation sont petits, il faut se servir de thermomètres très sensibles.

Les **dissolutions électrolysables** ont un point de congélation plus grand que celui qu'on trouverait en appliquant les lois précédentes. Celles-ci conviennent aux substances organiques dissoutes dans l'eau ou dans des dissolvants congelables.

Quand on part d'une solution étendue que l'on soumet à un refroidissement progressif, le dissolvant se congèle seul graduellement et la concentration s'élève ; on peut tracer une courbe de concentration qui part, sur l'axe des abscisses, du point de congélation du dissolvant pur. Mais, à une température suffisamment basse, la solution se congèle brusquement en entier, avant que tout le dissolvant se soit séparé. Cette température, inférieure à la température de congélation du dissolvant pur, est la température d'eutexie, trouvée en partant de la même solution, saturée, progressivement refroidie. Le point d'*eutexie* est l'intersection de la courbe de concentration avec dépôt de sel et de la courbe de concentration avec dépôt de glace. Son ordonnée est la concentration d'eutexie.

252. Chaleur de dissolution. — La dissolution, comme la fusion, absorbe de la chaleur. Si la dissolution est accompagnée d'un

---

quand on est arrivé à environ un demi-degré au-dessous du point de congélation présumé. Dès qu'il s'est formé de petites aiguilles de glace, le thermomètre remonte au point qu'il faut lire.

(1) On peut dire que, dans un dissolvant donné et avec des solutions très diluées, l'abaissement du point de congélation est le même lorsque la solution renferme, sous un même volume, le même nombre de molécules de différents corps dissous.

(2) Si, par exemple, on dissout 1 g. de *naphtaline* ($C^{10} H^8 = 128$) dans 100 g. de benzine, on trouve 0°39 pour l'abaissement du point de congélation par rapport à la benzine pure. D'après cela, $K = 128.0,39.100 = 4992$ ($M = 128$; $s = 0,39$; $c = 0,01$).

effet chimique, il y a deux actions contraires : *l'action chimique* qui est d'ordinaire une source de chaleur, et la *liquéfaction* qui absorbe de la chaleur. Mais s'il n'y a pas d'action chimique, ou si *la chaleur dégagée par l'action chimique est inférieure à la chaleur absorbée par la dissolution,* celle-ci étant empruntée au mélange, la température s'abaisse : on a un mélange réfrigérant.

253. Mélanges réfrigérants. — Un mélange réfrigérant contient au moins un corps solide, pour qu'il y ait un refroidissement dû à la dissolution. Les proportions jouent un rôle essentiel. Peu de glace ajoutée à beaucoup d'acide sulfurique dégage de la chaleur; beaucoup de glace et peu *d'acide sulfurique* en absorbent.

Un mélange d'*eau* et d'*azotate d'ammoniaque* à poids égaux produit un abaissement de température d'environ 10°.

Un mélange très employé est celui de *glace* pilée et de *sel marin;* il permet d'obtenir — 22°. Avec 3 en poids de *chlorure de calcium* en poudre et 2 de *neige*, on peut atteindre — 50°. et congeler le mercure. Une action chimique du sel active la fusion de la glace.

Citons encore un mélange d'*acide chlorhydrique* (5 en poids) et de *sulfate de sodium* (8 en poids). La présence de l'acide chlorhydrique accélère la dissolution du sulfate de sodium.

La connaissance de la *concentration d'eutexie* permet de fixer, dans certains cas, les proportions qui conviennent à la meilleure utilisation des corps employés.

Nous prendrons l'exemple d'un mélange de glace pilée et de sel marin.

Avec beaucoup de glace et peu de sel, tout le sel se dissout et le mélange se refroidit jusqu'à t^0. Il reste un excès de glace et l'état du système est figuré par un point P d'une courbe de concentration OPE de la solution non saturée en contact avec un excès du dissolvant solide (fig. 276 *bis*).

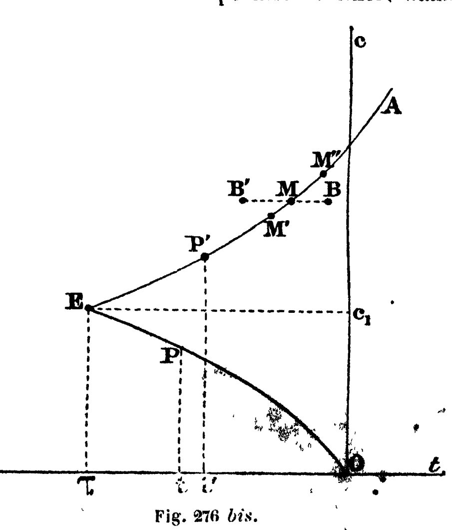


Fig. 276 *bis*.

S'il y a peu de glace et beaucoup de sel, la glace fond entièrement pendant la dissolution et la solution est saturée. Il y a un excès de sel et l'état du système est figuré par un point P' d'une courbe de concentration

AP'E de la solution saturée en contact avec un excès du sel précipité.

Quand les proportions sont celles de la concentration c_1 à la température τ du point E d'eutéxie, l'abaissement de température produit par la dissolution conduit à la température d'eutexie, au-dessous de laquelle la température *ne peut descendre* sans que tout se prenne en masse. Pour la glace et le sel marin, la température d'eutexie est — 22°, la concentration est 0,35; les proportions correspondantes des deux corps sont en poids : 2 de glace et 1 de sel marin.

254. Cristallisation. — Lorsque le retour à l'état solide d'un solide liquéfié est assez lent, les molécules se groupent parfois en formant des solides géométriques, à faces planes, appelés *cristaux*.

La cristallisation peut avoir lieu **par voie sèche**, sans dissolvant :

1° ***par fusion :*** avec des corps dont le point de fusion n'est pas très élevé, comme le soufre;

2° ***par sublimation :*** avec des corps tels que l'arsenic, qui passent de l'état gazeux à l'état solide, sans passer par l'état liquide.

La cristallisation après dissolution, **par voie humide**, est la plus usitée. Elle présente aussi deux méthodes :

1° ***par évaporation :*** à une température donnée, une solution *saturée* laisse déposer une partie du solide quand on évapore le dissolvant (sel marin dans l'eau).

2° ***par refroidissement :*** une solution saturée étant préparée à chaud, le liquide refroidi ne conserve pas dissous tout le solide qu'il contenait (cristallisation du sulfate de cuivre).

La cristallisation, comme toute solidification, est accompagnée d'un dégagement de chaleur.

255. Sursaturation. — La température d'une solution saturée à chaud d'un solide plus soluble à chaud qu'à froid peut s'abaisser sans que la solution abandonne une partie du solide dissous; la solution est alors dite *sursaturée*.

Pour montrer la sursaturation : on introduit une solution concentrée de *sulfate de sodium* (fig. 277) dans un tube fermé à l'une de ses extrémités et effilé à l'autre. Après avoir porté le liquide à l'ébullition pour chasser l'air, on ferme à la lampe l'extrémité effilée C. Par le refroidissement, rien ne se dépose, mais si l'on brise la pointe, la cristallisation commence par la surface et se propage jusqu'au fond du tube. Lorsque l'entrée de l'air n'a pas produit la cristallisation, on la détermine infailliblement *en projetant dans le liquide sursaturé une parcelle d'un cristal de sulfate de sodium* autour de laquelle rayonnent de nouveaux cristaux. C'est par la chute de petits cristaux de sulfate de sodium flottant dans l'air que

l'on explique la cristallisation au contact de l'air; un courant d'air tamisé sur du coton ne produit pas la cristallisation. La sursaturation est facile avec plusieurs sels de sodium : acétate, hyposulfite.

Une dissolution d'*azotate de calcium* sursaturée à chaud cristallise immédiatement au contact d'un cristal d'azotate de calcium, mais elle ne cristallise pas quand on la laisse refroidir lentement à l'air, car l'azotate de calcium est un sel déliquescent qui ne se rencontre pas dans l'air à l'état de poussières solides.

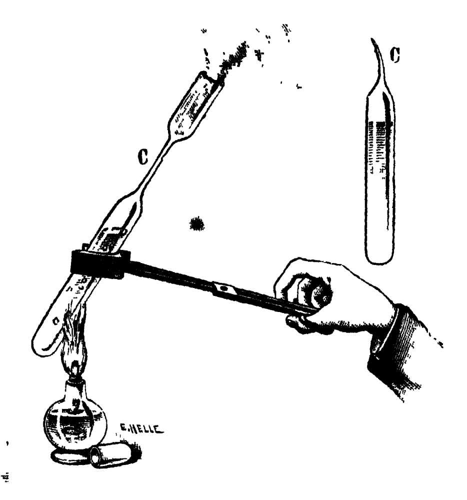


Fig. 277.

La cristallisation d'une solution sursaturée dégage de la chaleur. On le reconnaît en plongeant dans la solution sursaturée un thermomètre qui porte sur son réservoir un cristal du sel dissous. La cristallisation a lieu et le thermomètre monte.

VAPORISATION

La *vaporisation est le passage d'un corps à l'état gazeux*. On appelle *vapeur* le corps gazeux qui a pris naissance. La transformation d'un liquide en vapeur a lieu à toute température. Les liquides qui se réduisent en vapeur à une température peu élevée sont dits *volatils*. La vaporisation d'un liquide se produit soit simplement à la surface libre, soit dans toute la masse du liquide. Nous étudierons d'abord la vaporisation dans une enceinte limitée.

VAPORISATION DANS LE VIDE

256. On introduit, avec une pipette recourbée, quelques gouttes d'un liquide volatil dans la chambre d'un baromètre (fig. 278); le

liquide monte au sommet de la colonne, disparaît *presque instantanément* et la colonne barométrique *s'abaisse brusquement*. La dépression du mercure tient à la production de la vapeur du liquide. La force élastique de cette **vapeur**, invariable si la température ne varie pas, fait équilibre à la différence H — H' = CD entre la hauteur H du baromètre vide B, et la hauteur H' plus petite du baromètre à vapeur.

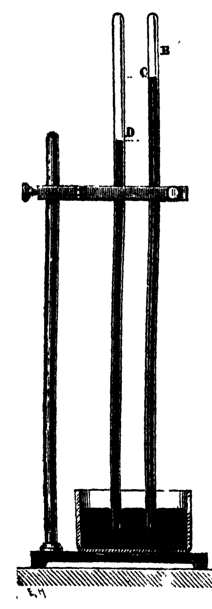


Fig. 278.

Quelques nouvelles gouttes de liquide, introduites dans le baromètre à vapeur, se vaporisent encore et le niveau du mercure subit une nouvelle dépression par un accroissement de la force élastique de la vapeur. Il arrive un moment où du liquide introduit cesse de se vaporiser et mouille les parois de la chambre barométrique.

Ainsi, dans le vide, un liquide donne *instantanément* naissance à une vapeur qui exerce une force élastique analogue à celle d'un gaz. Mais, à une même température, la force élastique d'une vapeur suit des lois différentes, suivant qu'il reste ou qu'il ne reste pas un excès du liquide générateur.

257. Lois des pressions exercées par une vapeur. — On peut observer les lois des pressions d'une vapeur avec un appareil semblable à celui qui a servi à vérifier la loi de Mariotte.

Description. — Cet appareil (fig. 279) se compose d'un tube de verre A divisé en centimètres cubes et d'un réservoir C relié au tube par un tuyau de caoutchouc. A sa partie supérieure, le tube A est muni d'un robinet R sur lequel on peut ajuster un entonnoir E.

Expérience. — Au début, l'entonnoir n'étant pas adapté, on ouvre le robinet R et on soulève le réservoir C jusqu'à ce que le tube A soit rempli de mercure. On ferme ensuite le robinet R et on abaisse le réservoir C ; le mercure descend en A, laissant le vide au-dessous de lui; la différence des niveaux du mercure dans le tube et le réservoir est égale à la pression atmosphérique.

On adapte alors l'entonnoir E, on y verse un liquide volatil tel que de l'éther et, en tournant le robinet R, on fait passer en A quelques gouttes de liquide. Le liquide disparaît et le mercure s'abaisse.

258. Vapeur non saturante. — Si le liquide introduit n'est pas

suffisant pour qu'il en reste un excès au-dessus du mercure, la vapeur est dite *sèche*.

A *température constante*, on fait varier le volume de la vapeur sèche, en portant le réservoir C à diverses hauteurs. Le volume V de la vapeur et la hauteur de la colonne soulevée varient en même temps; la force élastique de la vapeur est mesurée par la différence H - H', des deux niveaux a_1 et c_1 (fig. 279). Comme un gaz, la vapeur sèche suit la loi de Mariotte : le produit V (H - H') reste constant.

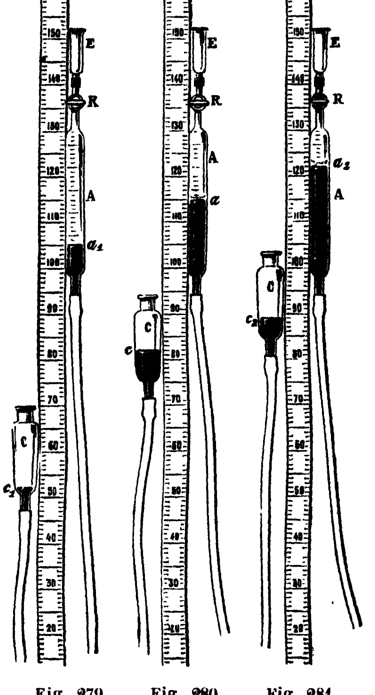


Fig. 279. Fig. 280. Fig. 281.

A *pression constante*, une vapeur sèche suit la loi de Gay-Lussac quand sa température varie. Son coefficient de dilatation diffère peu de celui des gaz.

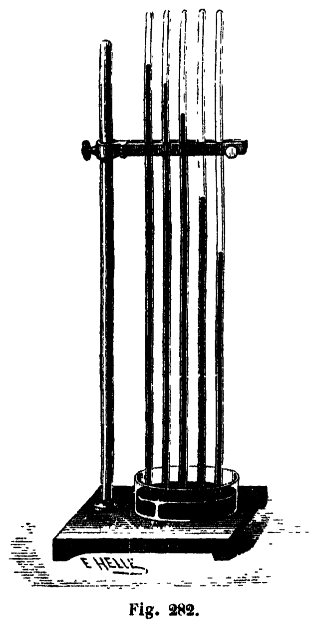
259. Vapeur saturante. — Si l'on comprime graduellement la vapeur en A, en soulevant le réservoir C, son volume décroît d'une façon continue, mais il arrive un moment où une goutte de liquide apparaît en a au-dessus du mercure. L'espace qui surmonte en A le mercure renferme alors toute la vapeur qu'il peut contenir, il est dit *saturé* et la vapeur est *saturante*. Si à partir de ce moment, l'on continue à soulever C, le liquide augmente, le volume de la vapeur diminue, mais la différence des niveaux a c ou a_2 c_2 dans le tube et le réservoir ne varie plus (fig. 280 et 281), donc la *vapeur conserve une force élastique constante*.

A une température donnée, *la force élastique de la vapeur saturante* est supérieure à la force élastique de la vapeur sèche, et elle *est maximum;* la *masse qui reste vaporisée* est constamment proportionnelle à la capacité qu'elle occupe dans la chambre barométrique et sa *densité est constante,* comme celle d'un gaz sous une pression déterminée.

En continuant à soulever C, la condensation se poursuit et finit par devenir totale. Si l'on abaisse ensuite le réservoir C, la couche

liquide diminue, mais la force élastique de la vapeur formée demeure invariable tant qu'il subsiste du liquide; quand tout le liquide est vaporisé, on est revenu au cas où la vapeur n'est plus au contact de son liquide (**258**).

260. Propriétés des pressions maxima. — 1° *La pression maximum d'une vapeur croît avec la température.* — On fait reposer sur une même cuvette à mercure un baromètre sec et un baromètre renfermant une vapeur en contact avec un excès de son liquide; on les entoure d'un manchon plein d'eau que l'on chauffe (fig. 284). La différence entre les niveaux dans les deux tubes croît avec la température. En même temps que la colonne du baromètre à vapeur se déprime, la petite couche de liquide qui surmonte le mercure diminue.


Fig. 282.

2° *A une température donnée, la pression maximum de la vapeur ne dépend pas du volume* (**259**); elle ne dépend que de la température.

3° *A une température donnée, la pression maximum dépend de la nature du liquide.* — Plusieurs baromètres sont disposés dans une même cuvette (fig. 282). La chambre du baromètre de gauche est vide, on fait passer de l'eau au-dessus du mercure dans le suivant, de l'alcool dans le troisième, du sulfure de carbone dans le quatrième, de l'éther dans le cinquième; ces liquides sont introduits en quantités suffisantes pour qu'il en reste un léger excès. Le mercure baisse inégalement : la dépression est plus forte pour l'éther que pour l'alcool, plus forte avec l'alcool qu'avec l'eau. La différence des niveaux dans le baromètre vide et dans un baromètre à vapeur mesure la pression maximum de la vapeur correspondante. A 20°, la force élastique de la vapeur d'éther vaut à peu près 25 fois celle de la vapeur d'eau.

Tous les liquides sont *volatils,* c'est-à-dire se réduisent en vapeurs. *A la température ordinaire,* la glycérine, les huiles grasses, l'acide sulfurique monohydraté ne donnent pas de vapeurs appréciables.

La force élastique de la vapeur de mercure est négligeable à la

température des observations barométriques et manométriques.

261. Équilibre de vaporisation. — Lorsqu'un mélange d'un liquide et de sa vapeur est maintenu à une température rigoureusement constante t, à la pression de saturation p qui est la force élastique maximum, les proportions relatives de liquide et de vapeur peuvent être quelconques, mais elles demeurent invariables et *en équilibre*. Tout le mélange passe à l'état liquide si, *en maintenant la pression p*, on abaisse un tant soit peu la température et, au contraire, il passe en entier à l'état de vapeur, si on élève la température. Si *en maintenant la température t* constante, on élève un tant soit peu la pression, tout le mélange passe à l'état liquide et, au contraire, à l'état de vapeur si on abaisse la pression.

262. Principe de la paroi froide ou Principe de Watt. — Dans une enceinte qui *ne présente pas la même température en tous ses points*, et qui renferme un liquide et sa vapeur, un équilibre ne peut exister que si la force élastique est *la même dans toute l'étendue* de l'enceinte.

La vapeur, de force élastique F, formée dans une partie chaude, se condense dans une partie froide ; la vaporisation se reproduit à la surface du liquide chaud pour remplacer la vapeur condensée et, lorsque le liquide s'est ainsi entièrement rendu dans la partie froide, la force élastique de la vapeur, dans toute l'enceinte, est égale à la force élastique maximum *f du point le plus froid*.

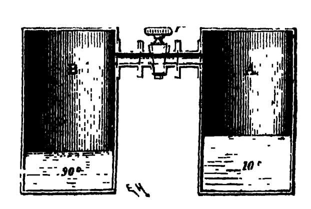


Fig. 283.

Soit deux récipients A et B (fig. 283) contenant de l'eau : B à 90° et A à 10° ; si l'on ouvre le robinet r de communication, tout le liquide de B *distille* en A. *L'équilibre s'établit,* quand la force élastique de la vapeur dans les deux récipients est la force élastique maximum à 10°.

Ce principe est appliqué : 1° dans la distillation ; 2° dans le condenseur de la machine à vapeur ; 3° dans la liquéfaction des gaz.

MESURE DES FORCES ÉLASTIQUES MAXIMA DE LA VAPEUR D'EAU

263. Mesure entre 0° et 100°. — Dalton a déterminé les forces élastiques maxima de la vapeur d'eau, entre 0° et 100°, en disposant deux baromètres sur une cuvette C en fonte, contenant du mercure et placée sur un fourneau (fig. 284). La chambre de l'un des baromètres B est vide, dans l'autre A il y a, au-dessus du mercure, de

la vapeur d'eau en contact avec un excès de son liquide. Les deux baromètres sont maintenus dans un manchon de verre rempli d'eau. Des thermomètres donnent la température du manchon.

Expérience. — On mesure avec un cathétomètre, la différence des niveaux du mercure dans les deux tubes, et on la convertit en *hauteur de mercure normal* (**217**). On en retranche une hauteur de mercure équivalente à la couche d'eau du baromètre mouillé (1). On obtient ainsi la force élastique à la température de l'expérience.

A la température d'ébullition de l'eau, le mercure descend dans le baromètre à vapeur jusqu'au niveau dans la cuvette, car, à cette température, la force élastique maximum de la vapeur d'eau est égale à 76 centimètres de mercure. Cet appareil ne peut donc servir au-dessus de la température d'ébullition.

Incertitudes. — Pour obtenir une température uniforme, il faut mélanger les différentes couches avec un agitateur D; or, par le mercure, l'agitation se transmet aux colonnes des baromètres. En outre, le manchon en verre soufflé donne lieu à des erreurs dans la visée des niveaux, car les parois, d'épaisseur irrégulière, abaissent ou relèvent les rayons lumineux à la façon de lames prismatiques.

Appareil de Regnault. — Regnault a remplacé le manchon de verre par une caisse en tôle de petite hauteur, présentant une fenêtre fermée

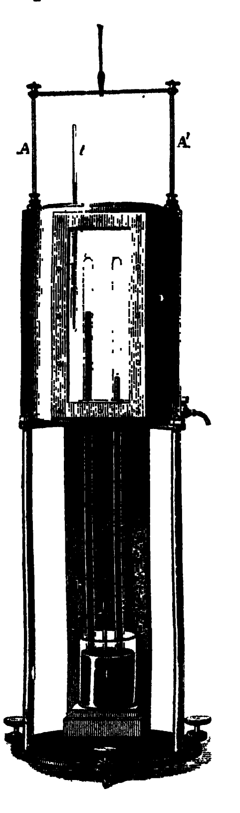


Fig. 283.

Fig. 284.

(1) Cette hauteur est $\frac{\varepsilon}{d}$, ε épaisseur de la couche, d densité du mercure.

par une glace *plane à faces parallèles.* Cette caisse est remplie d'eau que l'on chauffe (fig. 285). On vise avec un cathétomètre, à travers la glace, les niveaux du mercure dans les deux baromètres (1).

On obtient la force élastique maximum de la glace entre 0^0 et -30^0, en remplissant la caisse de mélanges réfrigérants de chlorure de calcium et de glace pilée.

Forces élastiques de la vapeur d'eau aux températures élevées. — *Principe de la méthode.* — La force élastique de la vapeur d'un liquide en ébullition est égale à la pression que supporte le liquide, et la température de la vapeur reste invariable tant que la pression sur le liquide est maintenue constante (**271**).

Si donc l'on fait bouillir de l'eau dans une atmosphère artificielle, sous une pression déterminée à l'avance, cette pression est la *force élastique maximum, à la température* où l'ébullition a lieu.

Résultats. — Les forces élastiques maxima de la vapeur d'eau ont été ainsi mesurées de 0^0 à 230^0.

0^0	$0^{cm},460$
20^0	1,789
50^0	9,198
100^0	76
121^0	2.76
153^0	5.76
180^0	10.76
230^0	28.76

A une force élastique f, en centimètres de mercure, correspond une pression par centimètre carré égale à f. 13,59.981 dynes.

Sur la courbe représentative de la force élastique de la vapeur d'eau (fig. 286), les températures sont portées sur l'axe horizontal, et les pressions en atmosphères sur l'axe vertical.

L'accroissement rapide de la force élastique de la vapeur d'eau aux températures élevées joue un rôle important dans la pratique des machines à vapeur. A 200^0, la force élastique de la

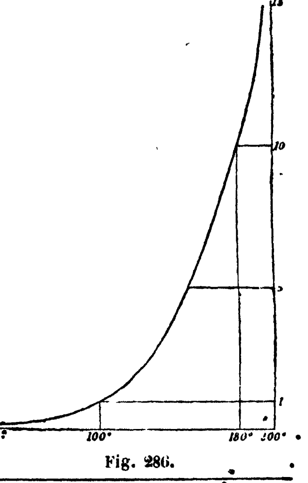


Fig. 286.

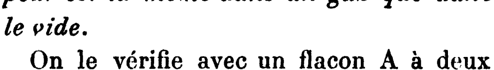
(1) Afin d'obtenir par l'agitation une température uniforme, Regnault réduisit la hauteur de la caisse à environ 20 centimètres et n'opéra avec cet appareil que jusqu'à 60°, car au delà, le mercure du baromètre mouillé était déprimé au-dessous du fond de la caisse. Comme la caisse n'entoure que la partie supérieure des tubes, la cuvette C est indépendante du bain d'eau et l'agitation ne se transmet pas aux colonnes des baromètres.

vapeur d'eau vaut 15 atmosphères ou environ 15 kilogrammes par centimètre carré.

264. Forces élastiques maxima des dissolutions. — Lorsqu'un liquide contient en dissolution une substance non volatile (*eau et acide sulfurique*, par exemple), le liquide émet *seul* des vapeurs et leur force élastique *f* est inférieure à la force élastique maximum F du liquide pur (*de l'eau*) ; à une même température, la différence F — *f* augmente avec la concentration de la solution.

VAPORISATION DANS UN GAZ

265. A une même température, *la pression maximum d'une va-*



peur est la même dans un gaz que dans le vide.

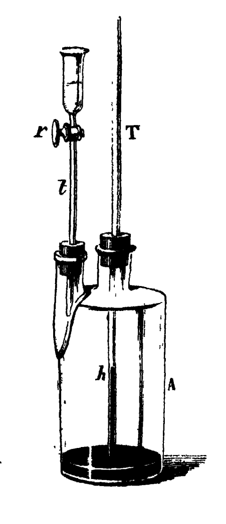


Fig 287.

On le vérifie avec un flacon A à deux tubulures qui contient de l'air à la pression atmosphérique. On y a versé du mercure où plonge un tube droit T. A la seconde tubulure est adapté un entonnoir à robinet contenant de l'éther (fig. 287). En ouvrant le robinet *r*, on introduit assez d'éther dans le flacon pour qu'il en reste sur le mercure un petit excès non vaporisé. Le mercure monte alors dans le tube droit d'une *hauteur égale à la pression maximum* de l'éther dans le vide à la même température.

La pression de l'air du flacon n'ayant pas varié, la vapeur saturante a acquis dans le gaz la même pression maximum que dans le vide. Toutefois, la formation de la vapeur a été *ralentie*, et d'autant plus que la pression du gaz est plus forte.

Loi du mélange d'un gaz et d'une vapeur. — Dans une enceinte, *la force élastique d'un mélange de gaz et de vapeur est égale à la somme des forces élastiques qu'exerceraient le gaz et la vapeur s'ils occupaient séparément tout l'espace.* C'est une extension de la loi du mélange des gaz.

Une vapeur *non saturante* suit la loi de Mariotte comme un gaz : par suite, le gaz et la vapeur *se comportent* alors *comme deux gaz.*

Dans un gaz, la force élastique d'une vapeur *saturante* est égale

à sa force élastique maximum dans le vide à la même température.

Si plusieurs vapeurs, sans action l'une sur l'autre, sont mélangées, chacune se comporte comme si elle était seule. La force élastique de la vapeur émise par le mélange est sensiblement la *somme* des forces élastiques des vapeurs isolées.

266. Masse d'un volume V d'air humide. — Une masse d'air humide, à t^0, sous une pression H, renferme de la vapeur d'eau de force élastique f. D'après la loi du mélange des gaz, l'air sec exerce la pression $H - f$.

La masse de l'air humide est égale à la somme de la masse m de l'air sec et de la masse m' de la vapeur d'eau.

Masse de l'air sec : $$m = V \frac{1}{1+\alpha t} \cdot \frac{H-f}{76} \cdot 0{,}001293$$

Masse de la vapeur : $$m' = V \frac{1}{1+\alpha t} \cdot \frac{f}{76} \cdot 0.001293.0{,}622.$$

La densité de la vapeur d'eau est 0,622 ou $\frac{5}{8}$.

$$m + m' = V \frac{1}{1+\alpha t} \cdot \frac{H - \frac{3}{8} f}{76} \cdot 0{,}001293.$$

DENSITÉ DES VAPEURS

267. Pour calculer la masse m d'un volume V de vapeur, il faut connaître la densité de cette vapeur.

Pour les vapeurs, comme pour les gaz, on mesure la densité par rapport à l'air. La densité de l'air a été déterminée directement (**241**).

La **densité d'une vapeur** *par rapport à l'air* est le rapport d des masses m et m_1 de volumes égaux de vapeur et d'air pris dans les mêmes conditions de température et de pression.

Ayant déterminé par une pesée la masse m d'une vapeur, mesuré son volume V, sa température T et sa pression H, on calcule la masse m_1 d'un égal volume d'air dans les mêmes conditions :

$$m_1 = V \frac{1}{1+\alpha T} \cdot \frac{H}{76} \cdot 0{,}001293. \quad \text{D'où } \frac{m}{m_1} = d.$$

268. Détermination expérimentale d'une densité de vapeur. — Il y a lieu de considérer successivement une *vapeur non saturante* et une *vapeur saturante*.

Vapeur non saturante. — On obtient rapidement la densité d'une vapeur non saturante en opérant sur une masse m de vapeur et en déterminant directement la masse d'air m_1 qui occupe le même volume dans les mêmes conditions.

L'appareil (fig. 288) est un réservoir A en verre, prolongé par un long col et placé dans un manchon dont la température est maintenue constante par la vapeur d'un liquide en ébullition. Cette température doit être *supérieure à la température d'ébullition* du liquide dont on veut déterminer la densité de vapeur.

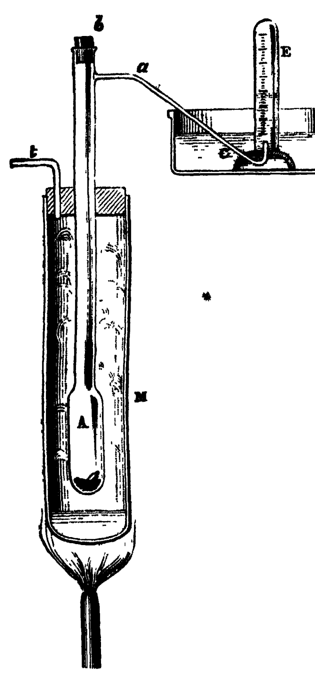


Fig. 288.

Par sa dilatation, de l'air sort, bulle par bulle, par un tube latéral *ac* qui se rend dans une cuve à eau. Quand il ne se dégage plus d'air, on dispose sur l'extrémité recourbée du tube abducteur une éprouvette graduée E, pleine d'eau.

On débouche alors un instant, en *b*, le tube du réservoir et l'on fait tomber une ampoule en verre mince contenant une masse *m* du liquide (1) (insuffisante pour saturer de vapeur tout le réservoir).

L'ampoule chauffée se brise et le liquide se vaporise. La vaporisation est trop rapide pour qu'il y ait diffusion et la vapeur produite chasse devant elle un volume d'air égal au sien. La masse d'air expulsée m_1 occupait, d'après la loi du mélange des gaz, un volume égal à celui que prend la vapeur, à la même pression et à la même température.

L'air expulsé se rend dans l'éprouvette; il y est saturé d'humidité; à la température t de la cuve, sous la pression $H - F$, il occupe un volume U; s'il était sec, il occuperait un volume V_0 à 0^0 et 76; sa masse est $m_1 = V_0 a$, a masse d'un centimètre cube d'air sec à 0^0 et 76.

$$\frac{U}{1 + \alpha t} \cdot (H - F) = V_0\, 76, \quad \text{et } m_1 = a \frac{U}{1 + \alpha t} \cdot \frac{H - F}{76}.$$

La densité cherchée est $d = \dfrac{m}{m_1}\cdot$

269. Résultats. — La densité par rapport à l'air d'une vapeur non saturante décroît quand la pression diminue et quand la température s'élève; elle tend vers une valeur limite. Cette *densité limite* est appelée ***densité théorique*** de la vapeur; elle est constante à des températures et à des pressions suffisamment éloignées du point de saturation. La vapeur se comporte alors comme un gaz parfait, suit exactement les lois de Mariotte et de Gay-Lussac et obéit à la relation $vp = RT$.

La densité théorique d est égale au *produit de la densité* 0,069 *de l'hydrogène par la moitié de la masse moléculaire de la substance;* cela résulte de ce que, d'après la loi d'Avogadro, le volume Mv_0 de la masse

(1) Le fond du réservoir est préservé par une couche d'amiante d'une rupture due à la chute de l'ampoule.

moléculaire M est constant pour tous les gaz; il peut être calculé pour l'hydrogène.

$$Mv_0 = \frac{M}{d.a} = \frac{M}{d.0,001293} = \text{(pour l'hydrogène)} \frac{2\ (1)}{0,069.0,001293},$$

d'où $$d = 0,069 \frac{M}{2} \ (2)$$

La densité théorique permet ainsi de calculer la masse moléculaire.

DENSITÉS PAR RAPPORT A L'AIR		DENSITÉS PAR RAPPORT A L'HYDROGÈNE	
Air	1	Hydrogène	1
Oxygène	1,1056	Oxygène	16
Eau	0,622	Eau	9
Alcool	1,61	Alcool	23
Mercure	6,97	Mercure	100

Vapeur saturante. — La densité par rapport à l'air d'une vapeur saturante croît avec sa pression maximum, c'est-à-dire avec la température. Elle est constamment supérieure à la densité théorique. A 100°, la densité de la vapeur d'eau saturante est égale à 0,640.

Aux températures inférieures à 50°, on prend, sans erreur appréciable, pour densité de la vapeur d'eau par rapport à l'air, la densité théorique 0,622 ou encore $\frac{5}{8}$, que la vapeur *soit ou non saturante.*

ÉVAPORATION

270. Vaporisation dans une atmosphère illimitée. —

Dans une enceinte limitée, un liquide se vaporise tant que l'espace n'est pas saturé. Dans une atmosphère illimitée, où l'espace ne peut plus être saturé, la plupart des liquides se vaporisent graduellement et finissent par disparaître (3).

La vaporisation d'un liquide, par sa surface libre, dans une atmosphère illimitée, s'appelle spécialement **évaporation**.

Rapidité de l'évaporation dans une atmosphère illimitée. — En déterminant la masse m de vapeur formée en une seconde, par la pesée du liquide avant et après une opération, on précise les conditions qui influent sur la rapidité de l'évaporation.

L'évaporation est proportionnelle à la surface S *d'évaporation*. On active l'évaporation de l'eau de la mer en la distribuant dans des bassins de grande surface et peu profonds (*marais salants*).

(1) Le quotient $\frac{2}{0,069.0,001293}$ est $\frac{M}{d.a}$ pour l'hydrogène ($M = 2$; $d = 0,069$).

(2) Comme $0,069 = \frac{1}{14,4}$, on a $d = \frac{M}{28,8}$ et $M = 28,8d$.

(3) La vaporisation devient complète dans une atmosphère limitée si l'on enlève la vapeur avec une pompe ou si on l'absorbe par un réactif, à mesure qu'elle se produit.

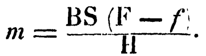
L'évaporation est sensiblement proportionnelle à F — f (f est la force élastique actuelle de la vapeur et F sa force élastique maximum à la même température) (1). D'après cela, dans un air absolument sec où $f = 0$, l'évaporation de l'eau est proportionnelle à F. Dans un air saturé d'humidité où $f = F$, l'évaporation de l'eau sera nulle ; mais l'évaporation de l'éther, par exemple, se fera comme si l'air était sec.

L'évaporation croît avec la température, car l'élévation de température fait croître la force élastique maximum F. Un objet mouillé sèche, en effet, rapidement s'il est chauffé.

L'évaporation croît avec l'agitation de l'air. L'entraînement de la vapeur saturée qui couvre un liquide amène à sa surface un air plus sec, capable de recevoir de nouvelles quantités de vapeur. Ainsi, un linge mouillé sèche rapidement s'il est exposé au vent.

L'évaporation varie sensiblement en raison inverse de la pression extérieure. Dans le vide, l'évaporation a lieu assez vite pour paraître instantanée.

Résumé. — Les lois précédentes sont résumées par l'expression :



$$m = \frac{BS(F - f)}{H}.$$

B dépend de la nature du liquide et croît avec l'agitation de l'air.

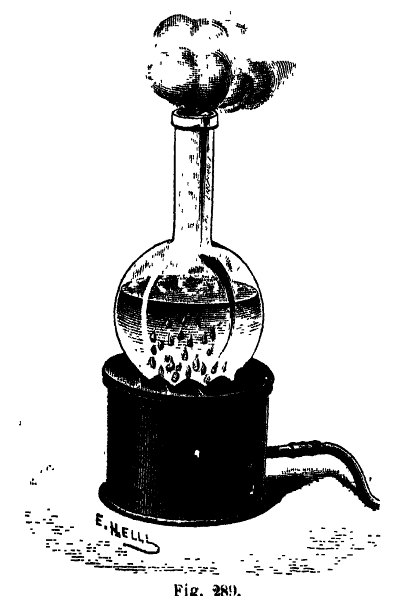


Fig. 289.

ÉBULLITION

Si l'on chauffe graduellement un liquide, il se produit d'abord une évaporation à la surface et un échauffement de la masse. A un certain moment, *la température ne s'élève plus* et il y a ébullition, *c'est-à-dire production de bulles de vapeur au sein du liquide.*

271. LOIS DE L'ÉBULLITION. — 1° *A une pression donnée, l'ébullition a lieu à une*

(1) Cette loi est exacte si la différence F — f est faible.

température déterminée, constante pour chaque liquide. Cette température s'appelle le **point d'ébullition.** Le *point d'ébullition est dit normal* sous la pression 76.

POINTS D'ÉBULLITION SOUS LA PRESSION 76

Acide sulfureux	—10°	Acide sulfurique monohydraté	325°
Ether sulfurique	35°,5	Mercure	350°
Alcool absolu	78°,5	Soufre	440°
Eau distillée	100°	Cadmium	830°
Phosphore	290°	Zinc	950°

2° *Pendant l'ébullition,* malgré l'action continue du foyer, la *température d'un liquide pur reste constante.*

Ces deux lois se vérifient avec un thermomètre.

La constance de la température pendant l'ébullition prouve l'existence d'une **chaleur de vaporisation.** La chaleur du foyer sert à effectuer le changement d'état; un accroissement de chaleur du foyer n'élève pas la température du liquide. Un liquide qui bout à gros bouillons n'est pas plus chaud que s'il bout doucement; la rapidité de la vaporisation va seule en croissant.

3° Pendant l'ébullition, *la force élastique de la vapeur dégagée est égale à la pression qui s'exerce sur le liquide.*

La démonstration se fait *à la pression atmosphérique*, avec un tube recourbé A, ayant la forme d'un tube de Mariotte réduit; il contient en *a* un peu d'eau privée de gaz, isolée de l'air extérieur par du mercure qui s'arrête un peu au-dessus de la courbure. On chauffe ce tube dans de la *vapeur* d'eau portée à l'ébullition dans un ballon B, sous la pression atmosphérique.

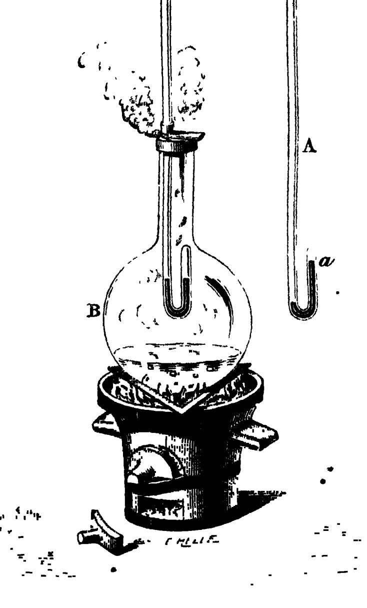


Fig. 200.

La vapeur d'eau saturante, produite en *a,* déprime le mercure par sa force élastique maximum à la température d'ébullition de l'eau dans le vase B, et *les deux niveaux dans le tube recourbé s'établissent dans un même plan horizontal.* La force élastique de

la vapeur en *a* fait donc équilibre à la pression atmosphérique qui s'exerce par la grande branche ouverte du tube A (fig. 290).

Pour opérer *sous une pression quelconque*, on fait bouillir de l'eau dans une atmosphère artificielle (fig. 291).

De l'eau distillée est renfermée dans une chaudière en cuivre P qui repose sur un fourneau et communique avec un récipient dans lequel on peut comprimer ou raréfier de l'air. Le récipient est entouré d'un bain d'eau A qui maintient sa température constante.

Le col de la chaudière est relié au récipient par un tube incliné, entouré d'un cylindre R, où circule l'eau froide du récipient N. Ce tube constitue un *réfrigérant ascendant* où les vapeurs émises par l'eau se condensent pour retomber dans la chaudière P (1).

On établit dans le récipient une *pression fixe* par un tube C qui se rend

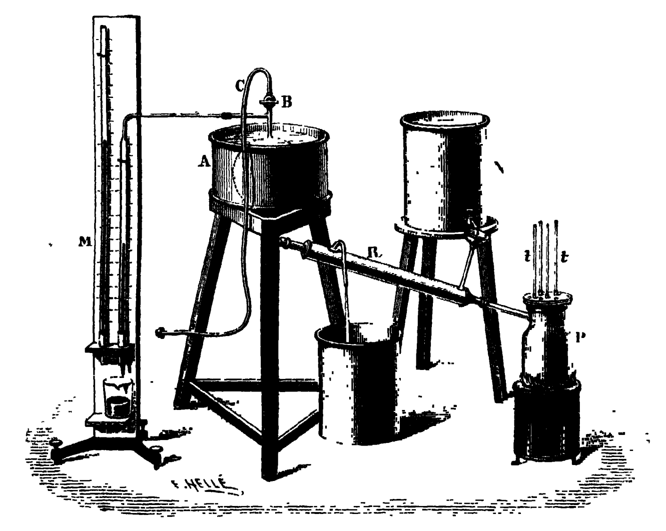


Fig. 291.

à une machine pneumatique ou à une machine de compression et on chauffe la chaudière. La *constance des thermomètres t* prévient de l'ébullition de l'eau, on lit la température; la force élastique correspondante de la vapeur est égale à la différence des niveaux du mercure dans les deux tubes du manomètre M, accrue de la pression atmosphérique.

En *variant la pression* de l'atmosphère artificielle dans laquelle l'eau bout, on obtient l'ébullition à des températures différentes.

---

(1) Le principe de la paroi froide (262) ne s'applique pas ici; il convient en effet à une enceinte où *un équilibre fixe s'est établi dans toutes les parties;* dans l'appareil actuel un équilibre fixe ne s'établit pas dans le réfrigérant ascendant; c'est par l'intermédiaire de couches vaporisées à diverses températures et en mouvement continuel de vaporisation et de condensation que la force élastique de la vapeur de la chaudière P fait équilibre à la fois au mercure soulevé du manomètre et à la pression artificielle.

Accroissement de volume. — Le volume d'une vapeur est notablement supérieur à celui du liquide. Un litre d'eau, à 100° et sous la pression 76, produit 1646 litres de vapeur.

Description du phénomène de l'ébullition de l'eau. — Quand on chauffe de l'*eau* dans un vase de verre, on voit d'abord se dégager des bulles très fines, provenant de l'*air dissous* et de l'air emprisonné entre le liquide et la paroi du vase. Plus tard, la température s'élevant, il apparaît sur les parois directement chauffées des bulles plus grosses; ce sont des *bulles de vapeur;* leur force élastique, à l'instant de leur formation, est égale à la pression de l'air extérieur accrue de la pression de la colonne liquide qui les surmonte; elles décroissent en montant et disparaissent, en se condensant au contact de couches moins chaudes; leur force élastique, à la température qu'elles prennent, devient en effet inférieure à la pression qu'elles subissent de l'extérieur. La condensation des premières bulles de vapeur est accompagnée d'un bruissement appelé *chant* du liquide. Quand toute la masse est suffisamment chaude, une bulle formée au fond du vase ou sur les parois, ne se condense plus; elle grossit au contraire en s'élevant, car sa force élastique diminue, puisque la colonne liquide qu'elle supporte décroît à mesure qu'elle monte. Arrivée à la surface, elle a une force élastique égale à la pression extérieure et elle a la température qui correspond à cette force élastique (100° sous la pression 76).

CONDITIONS QUI FONT VARIER LE POINT D'ÉBULLITION

272. Abaissement du point d'ébullition sous de faibles pressions. — Lorsque la pression extérieure diminue, le liquide *atteint, à une température plus basse, une force élastique maximum égale à la pression extérieure.*

L'abaissement du point d'ébullition avec la pression s'observe à la surface du globe dans un vase ouvert, à mesure que l'altitude augmente. Sous une pression de 76 centimètres l'eau bout à 100°; au Puy-de-Dôme où la pression est de 63 centimètres, le point d'ébullition est 95°; à Quito, pour 55^{cm} on a 91°,3; sur le Mont-Blanc, on descend à 84°,5. L'observation du point d'ébullition permet de mesurer les altitudes; on se sert pour cela de l'*hypsomètre*. Il consiste en une étuve à eau bouillante où plonge un thermomètre sensible; une table des forces élastiques maxima donne la pression qu'on aurait obtenue directement avec un baromètre.

Pour *purifier* un liquide que la chaleur décompose facilement, on diminue la pression au-dessus de lui pour produire l'ébullition à basse température. (*Distillation sous pression réduite.*)

Élévation du point d'ébullition avec la pression. — Si la pression dépasse 76 centimètres, il faut élever la température du liquide au-dessus du point d'ébullition normal pour atteindre une force élastique maximum supérieure à 76 centimètres.

Sous 2 atmosphères, l'eau n'entre en ébullition qu'à 120°.

Correction du point 100° des thermomètres. — Dans la détermination du point 100 d'un thermomètre, le niveau où s'arrête le mercure dans la vapeur d'eau bouillante ne représente le point fixe 100 que si la pression extérieure est 76 centimètres. La table des forces élastiques maxima fait connaître la température qui correspond à la pression observée H. A 100°, une différence de 27 millimètres dans la pression correspond à une variation de 1° ; on admet, sans erreur appréciable, la proportionnalité pour de plus petits écarts.

$$t = 100^0 + \frac{H - 76}{2,7}.$$

Influence de la profondeur du liquide sur la température d'ébullition. — La vapeur ne se forme que lorsque sa force élastique est au moins égale à la pression qui s'exerce sur elle, or cette pression croît dans un liquide avec la distance au niveau libre ; la température, dans un liquide en ébullition, augmente donc avec la profondeur à laquelle le thermomètre est plongé.

273. Influence de la pureté du liquide. — Si, dans un liquide volatil pur dont la force élastique maximum de vapeur à t^0 est F, on dissout un solide, la force élastique de la vapeur émise à t^0 par la dissolution est inférieure à F. La force élastique n'atteint donc la pression atmosphérique et le liquide n'entre en ébullition qu'*à une température supérieure à la température d'ébullition du dissolvant pur.* Le point d'ébullition de l'eau s'élève quand elle tient en dissolution des substances étrangères. Pour une solution saturée, l'élévation est très accentuée. Ainsi, l'eau saturée de chlorure de sodium bout à 108°5, l'eau saturée de chlorure de calcium à 179°5. Il s'agit de la température marquée par un thermomètre plongé dans le liquide, car *la température de la vapeur d'eau pure* qui s'échappe au-dessus de la surface libre est toujours 100°, sous la pression 76.

Élévation du point d'ébullition des dissolutions étendues. — Pour un même dissolvant et pour une même substance dissoute, l'*élévation* du

point d'ébullition est *proportionnelle* à la masse c de substance dissoute dans un gramme du dissolvant ou à la *concentration*.

A égalité de concentration, pour un même dissolvant, l'élévation s est en raison inverse de la masse moléculaire M de la substance dissoute : $s = \frac{cK}{M}$, K est indépendant de la substance dissoute et varie seulement avec le dissolvant. On en déduit $\frac{sM}{c} = K$. En d'autres termes, si l'on fait avec le même dissolvant des solutions étendues renfermant chacune la même fraction des masses moléculaires de différents corps solubles, l'élévation du point d'ébullition est la même pour toutes ces solutions. L'élévation s étant observée, la concentration étant connue, ainsi que le poids moléculaire de la substance dissoute, on peut calculer K. Ayant ainsi calculé K, si, pour une substance de masse moléculaire inconnue M_1, l'elévation observée est s_1, pour une concentration c_1, dans le même dissolvant, l'équation $\frac{s_1M_1}{c_1} = K$ fera connaître M_1. C'est une méthode *ébullioscopique* de détermination des masses moléculaires.

Les lois précédentes, établies pour des dissolutions étendues de substances organiques dans l'eau et dans des dissolvants volatils, ne conviennent pas aux ***dissolutions aqueuses électrolysables***.

274. Influence de la présence d'un gaz. — L'ébullition n'a lieu à la température à laquelle la force élastique de la vapeur est égale à la pression qui surmonte le liquide, *que s'il y a des gaz dans le liquide*. Les bulles de gaz se comportent comme des *noyaux de formation* des bulles de vapeur. *Dans un liquide purgé de gaz, il se produit un retard à l'ébullition*, le point d'ébullition s'élève.

Ainsi, lorsque, dans un ballon de verre lavé à l'acide sulfurique, on a fait bouillir de l'eau assez longtemps pour chasser tout l'air qui adhère aux parois, l'ébullition a lieu au-dessus de 100°. L'ébullition cesse quand on retire le ballon du feu, bien que la température dépasse encore 100°. Mais l'ébullition reparaît avec violence, si l'on fait passer un courant électrique qui produit des bulles gazeuses en décomposant l'eau (fig. 292); l'ébullition cesse quand on interrompt le courant. Il est plus simple de projeter dans l'eau une limaille métallique qui apporte de l'air adhérant à sa surface. Cette limaille ne provoque plus l'ébullition lorsque son air a été dégagé par une ébullition prolongée.

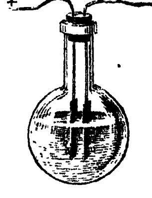


Fig. 292.

L'ébullition se reproduit encore si, au lieu de projeter de la limaille, on descend dans l'eau une petite cloche de verre v, renversée, formée à l'extrémité d'un tube t étranglé à la lampe

(fig. 293) et contenant un peu d'air. Les bulles de vapeur partent exclusivement de l'extrémité de la petite cloche et chacune des bulles entraîne une très petite quantité de gaz. Une masse d'air extrêmement faible entretient l'ébullition pendant un temps fort long. L'ébullition cesse quand on retire la cloche.

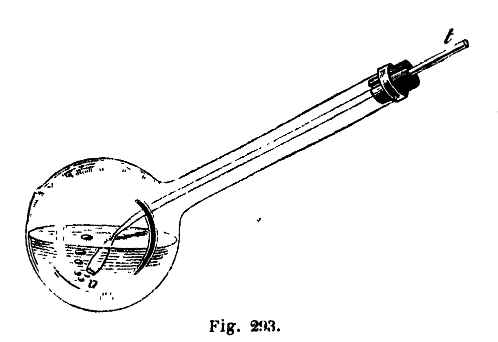


Fig. 293.

La suppression des parois solides permet d'éviter plus aisément les gaz au contact du liquide à vaporiser. Si, dans un mélange, en proportions convenables, d'*huile de lin* et d'*essence de girofle* ayant, un peu au-dessus de 100°, une densité égale à celle de l'eau, on introduit des gouttes d'eau, elles forment des sphères qui restent suspendues sans se mélanger au liquide. On a pu élever jusqu'à 180°, sans ébullition, la température de gouttes qui n'avaient qu'un millimètre de diamètre. Si on les touche avec une baguette de verre, l'air qui adhère au verre fournit à la vapeur le gaz dont elle a besoin pour se former et une violente vaporisation a lieu.

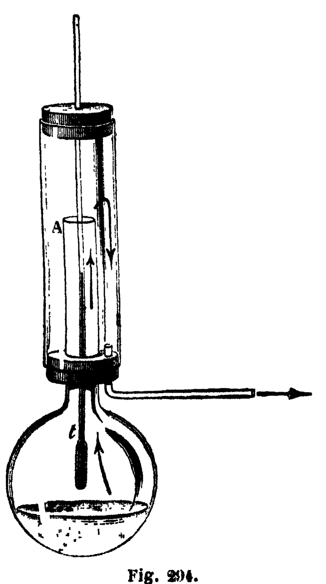


Fig. 294.

275. Influence de la viscosité du liquide. — La résistance à l'écartement des molécules croît avec la cohésion du liquide; aussi, l'ébullition de certains liquides visqueux, tels que l'acide sulfurique, est-elle accompagnée de soubresauts. On facilite alors l'ébullition par l'addition de corps inertes qui apportent dans le liquide une provision d'air (coke, fils de platine, etc...).

276. Détermination du point d'ébullition d'un liquide. — Afin d'obtenir le point d'ébullition précis d'un liquide, on plonge un thermomètre, non dans le liquide lui-même dont la température peut dépasser le point d'ébullition pour différentes raisons (profondeur du liquide, expulsion des gaz,

sels en dissolution), mais *dans la vapeur* au-dessus de la surface liquide. La vapeur, avant de s'échapper au dehors, préserve le thermomètre *t* de tout refroidissement en entourant le col A du ballon (fig. 294). Pendant l'ébullition, la température du thermomètre est fixe.

Dans un *mélange de deux liquides,* le point d'ébullition est intermédiaire entre les points d'ébullition des liquides composants et varie avec leurs proportions. Ce point d'ébullition reste fixe, si par un dispositif particulier, tel qu'un réfrigérant ascendant (fig. 291), on maintient constante la composition du mélange. L'observation du point d'ébullition d'un mélange renseigne assez exactement sur les *proportions relatives* des liquides. On l'utilise pour la recherche du titre des mélanges alcooliques.

277. Liquide chauffé en vase clos. — L'ébullition d'un liquide chauffé en vase clos est impossible lorsque toutes les parois ont la même température; elle devient possible si une portion de l'enceinte est maintenue plus froide.

1° Toutes les parties de l'enceinte ont la même température. — Les vapeurs qui se forment ajoutent leur force élastique à la pression du gaz qui surmonte le liquide.

L'ébullition n'a pas lieu, car l'espace libre qui surmonte le liquide est immédiatement *saturé* par une vapeur de force élastique égale à la force élastique maximum à la température de l'expérience; cette vapeur *s'oppose, pour cette température, à toute vaporisation ultérieure.* En continuant à chauffer, la température s'élève graduellement sans ébullition. C'est le cas de la marmite de Papin. L'ébullition ne se produit dans une chaudière de machine à vapeur que parce qu'on enlève de la vapeur.

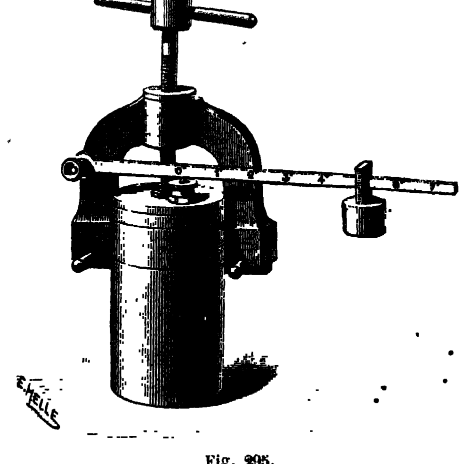


Fig. 295.

Marmite de Papin. — Une chaudière en bronze, à parois très résistantes, est remplie incomplètement d'eau et fermée par un couvercle fortement pressé par une vis (fig. 295).

La pression de la vapeur d'eau augmentant très vite à mesure que

la température s'élève, le couvercle porte une ouverture fermée par une soupape de sûreté sur la tête de laquelle appuie un levier du troisième genre chargé d'un poids. La distance du poids au point fixe est réglée pour que la soupape se soulève quand la force élastique de la vapeur atteint une certaine limite.

Quand on ouvre la soupape, la pression diminue brusquement à la surface du liquide de la chaudière et une violente ébullition a lieu. La température s'abaisse à 100^0 si la grandeur de l'ouverture permet à la vapeur de se dégager assez librement pour que la pression tombe à 76 centimètres.

La marmite de Papin sert, sous le nom *d'autoclave*, à *surchauffer* un liquide au-dessus de son point d'ébullition normal; par exemple, pour dissoudre dans l'eau la gélatine des os ou pour stériliser des substances à conserver.

De même, on emploie en chimie des *tubes scellés* pour chauffer des liquides au-dessus de leur point d'ébullition.

2° Une partie de l'enceinte a une température inférieure à celle du liquide. — L'ébullition a lieu en vase clos si la température *d'une partie de l'enceinte* est maintenue au-dessous de la température du liquide (*principe de la paroi froide*). C'est le cas des appareils à distillation; c'est encore le cas d'une expérience due *à Franklin* (fig. 296).

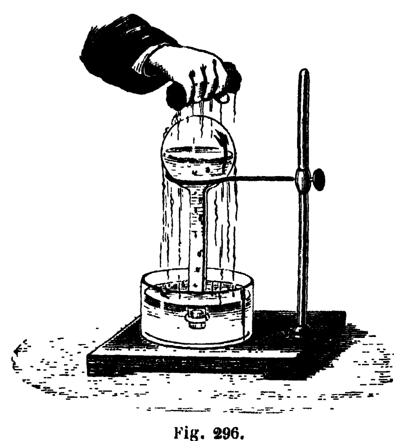


Fig. 296.

On fait bouillir de l'eau dans un ballon ; quand l'air a été chassé par la vapeur, on bouche le ballon, on le retourne et, pour éviter une rentrée d'air, on plonge le col dans un vase contenant de l'eau. L'ébullition cesse, mais si l'on refroidit la surface du ballon, par exemple en y versant de l'eau, la vapeur se condense; la diminution de force élastique permet au liquide de bouillir de nouveau. L'ébullition a lieu alors à une température d'autant plus basse que le ballon est plus refroidi.

PHÉNOMÈNES DE CALÉFACTION

278. En jetant un peu d'eau sur une plaque métallique chauffée au-

dessus de 150°, cette eau se sépare en gouttes à peu près sphériques qui roulent sur la plaque et se réduisent assez lentement en vapeur.

Si l'eau a été versée sur une plaque métallique légèrement concave et très chaude, le liquide ne se divise pas, il forme une masse à bords arrondis et mobiles, qui disparaît lentement, sans donner les abondantes vapeurs qui se produiraient si la plaque n'était chauffée qu'à 100°.

Le liquide est dit *caléfié;* il ne mouille pas la plaque et forme un ménisque *convexe* comme une goutte de mercure sur le verre. On constate de diverses manières l'*absence de contact* : si la plaque est percée de petits trous, le liquide ne les traverse pas; dans la caléfaction de l'acide azotique sur une lame d'argent, le métal n'est pas attaqué; avec une lame bien horizontale et de l'eau rendue opaque par un peu d'encre, les rayons lumineux d'une bougie passent entre un globule caléfié et la plaque (fig. 297); en joignant l'un des pôles d'une pile à la plaque et l'autre au globule, le courant électrique est interrompu. Lorsque la plaque se refroidit, il arrive un moment où la goutte s'aplatit, mouille le métal (le courant électrique passe) et se vaporise brusquement.

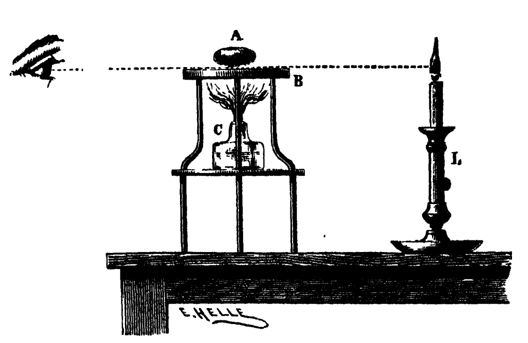


Fig. 297.

Comme le liquide caléfié ne touche pas le métal, la chaleur de ce dernier parvient difficilement au liquide à travers la vapeur interposée; d'ailleurs une abondante évaporation par la surface du liquide abaisse la température du globule. Un thermomètre à petit réservoir, plongé dans la goutte, indique une température *inférieure à celle de l'ébullition.*

Ainsi l'acide sulfureux liquide bout à — 8°; quelques gouttes de ce liquide versées dans un creuset de platine chauffé au rouge, restent liquides sans bouillir; leur température est inférieure à — 8°; si l'on y projette un peu d'eau, cette eau se congèle et, en retournant brusquement le creuset, on retire de la glace d'un creuset chauffé au rouge.

La caléfaction explique certains phénomènes qui paraissaient étranges. Ainsi, on peut plonger impunément la main humide dans un bain de fonte de fer en fusion : le liquide qui mouille la main préserve la peau du contact avec le métal fondu.

DISTILLATION

279. *Distiller un liquide, c'est le réduire en vapeurs que l'on condense ensuite par le refroidissement.* Un appareil à distillation

est une enceinte où deux parties sont maintenues à des températures T et t. Une vapeur formée dans une région de température T va se condenser dans la région plus froide de température t. L'équilibre ne peut exister que lorsque toute la vapeur formée s'est accumulée dans la partie froide (**262**) où s'exerce la force élastique de la vapeur à la température t. Lorsque l'enceinte froide communique avec l'atmosphère, on chauffe le liquide à sa température d'ébullition sous la pression atmosphérique.

Appareil à distillation. — L'appareil employé industriellement pour les distillations est appelé *alambic*. Une chaudière en cuivre A, nommée *cucurbite*, contient le liquide à distiller; elle est chauffée sur un fourneau. Dès que le liquide est en ébullition, sa vapeur monte dans un *chapiteau* B, en forme de dôme, qui ferme la chaudière et passe dans un tuyau S appelé *serpentin*, contourné en spirale et placé dans un réfrigérant E plein d'eau froide. La vapeur se condense au contact des parois froides du serpentin (fig. 298).

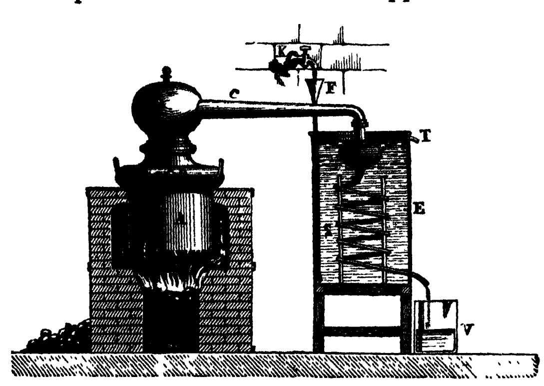


Fig. 298.

Comme la vapeur abandonne, en se liquéfiant, une grande quantité de chaleur, le serpentin échauffé ne condenserait plus la vapeur si l'on ne faisait arriver, *au fond du réfrigérant*, un courant continu d'eau froide par un entonnoir F et un tube. L'eau échauffée, moins dense, monte et s'écoule par un trop-plein T, disposé à la partie supérieure du réfrigérant.

Purification de l'eau. — La distillation sert à purifier de nombreux liquides; en l'appliquant à l'eau, la vapeur condensée fournit une eau pure, les sels dissous restent dans la chaudière.

Distillations fractionnées. — On sépare par la distillation des liquides inégalement volatils. En distillant un mélange de deux liquides L et L′ dont les points d'ébullition sont 50° et 100°, L passe seul à 50° et sa vapeur se condense. Si l'on continue à chauffer, L′ passe à son tour à 100°. On a ainsi *fractionné* le mélange.

Le pétrole brut présente un exemple de distillations fractionnées avec produits complexes. Entre 45° et 70° se dégage l'éther de pétrole; entre 120° et 150°, l'essence minérale; entre 150° et 280°, l'huile d'éclairage; à 400°, des huiles de graissage et la paraffine.

Si les températures d'ébullition de L et L′ sont *voisines*, les premières parties recueillies renferment L avec une petite quantité de L′. En recommençant l'opération sur le résultat, L domine davantage dans le produit. On arrive à un liquide à peu près pur. C'est ainsi qu'on *rectifie* l'alcool, pour le débarrasser de l'eau.

Essai des liquides alcooliques. — Quand une liqueur ne contient que de *l'eau et de l'alcool*, on fait l'essai avec l'alcoomètre centésimal. Si la liqueur renferme des substances dissoutes qui modifient la densité, on commence par effectuer une distillation qu'on arrête quand le tiers du liquide a passé. En ajoutant de l'eau au liquide distillé, on reproduit le volume primitif et on détermine, avec l'alcoomètre, la proportion d'alcool du mélange d'eau et d'alcool qui a le même titre que la liqueur à essayer.

Distillation dans le vide. — Pour purifier par distillation des liquides que la chaleur décompose à une température inférieure à la température d'ébullition sous la pression atmosphérique, on abaisse la température d'ébullition par une diminution de la pression dans l'appareil à distillation (**272**).

LIQUÉFACTION DES VAPEURS

280. On donne spécialement le nom de **vapeurs** aux fluides gazeux obtenus par la vaporisation de substances qui sont liquides à la température ordinaire. Deux moyens sont employés pour liquéfier une vapeur : la compression et le refroidissement.

Compression. — *A une température donnée,* on soumet la vapeur à une pression supérieure à la force élastique maximum qui correspond à cette température. Au-dessus du point d'ébullition normal, il faut une pression supérieure à la pression atmosphérique.

Refroidissement. — *A une pression déterminée,* on refroidit la vapeur jusqu'à une température pour laquelle sa force élastique maximum est inférieure à la pression exercée. A la pression atmosphérique, on doit refroidir la vapeur au-dessous du point d'ébullition normal de son liquide [1].

(1) Rappelons que la liquéfaction d'une vapeur *dégage de la chaleur*, car la vapeur

LIQUÉFACTION DES GAZ

281. Les vapeurs non saturantes se comportant comme des gaz (**258**), il y avait lieu de penser que les gaz pouvaient être des *vapeurs très éloignées de leur point de liquéfaction*, à la température et à la pression ordinaires. En effet, *les gaz ont été liquéfiés*, par les mêmes procédés que les vapeurs : refroidissement, compression et, enfin, compression et refroidissement combinés.

Refroidissement sous la pression atmosphérique. — *Le refroidissement seul permet de liquéfier tous les gaz sous la pression atmosphérique.* On porte le gaz *au-dessous du point d'ébullition normal* de son liquide ; la force élastique maximum du gaz est alors inférieure à la pression atmosphérique.

Prenons par exemple l'*acide sulfureux*. Le gaz, produit dans un ballon B (fig. 299) se dessèche en traversant une éprouvette refroidie E (où se condense une partie de la vapeur d'eau) et un tube T rempli de

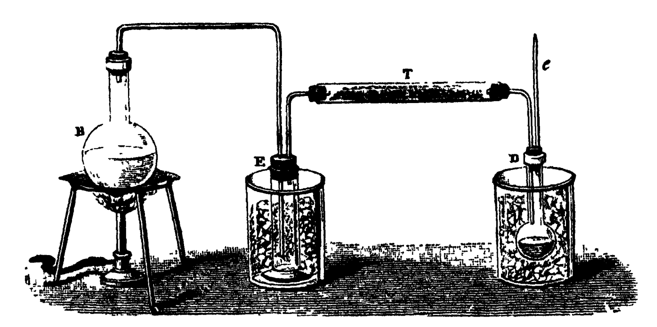


Fig. 299.

chlorure de calcium. Le gaz sec se rend dans un ballon D à long col plongé dans un mélange réfrigérant. Ce ballon est terminé par une pointe effilée *e* ouverte dans l'atmosphère. Le gaz se liquéfie au-dessous de — 8°, qui est le point d'ébullition normal de son liquide.

L'oxygène doit être refroidi à — 182°, l'hydrogène à — 250°.

Compression à la température ordinaire. — Au-dessus du point d'ébullition normal d'un gaz liquéfié, la force élastique du gaz croît rapidement, mais on pouvait espérer qu'en comprimant suffisamment un gaz à la température ordinaire, on dépasserait la force élastique maximum relative à cette température.

---

abandonne en se condensant la chaleur qui a été fournie précédemment au liquide pour le vaporiser.

L'appareil de Pouillet a permis, en effet, de liquéfier un grand nombre de gaz par simple compression.

C'est un récipient A, en acier, renfermant du mercure et au dessus de l'huile, et dans lequel s'enfonce un piston P à vis (fig. 300). Ce récipient communique, par un tuyau, avec une boîte en acier sur laquelle sont assujettis deux tubes de verre, très résistants, calibrés, hauts de deux mètres. On introduit des gaz secs par le haut des tubes. Le tube T contient le gaz à liquéfier, T' contient de l'air pour apprécier la pression par sa variation de volume. On scelle au chalumeau l'extrémité des tubes et on exerce une pression croissante avec le piston à vis.

A 10°, l'anhydrique sulfureux se liquéfie sous une pression de 2 atm. 1/2, pression supérieure à la force élastique maximum de la vapeur de l'anhydride sulfureux à 10° ; à la même température, l'anhydride carbonique se liquéfie par 45 atmosphères.

La compression seule ne suffit pas pour liquéfier tous les gaz à la température ordinaire.

Compression et refroidissement combinés. — ***La compression et le refroidissement combinés ont liquéfié tous les gaz.*** **Faraday** produisait un gaz dans une branche A d'un tube en verre, recourbé, à parois résistantes (fig. 301) ; le gaz se comprimait lui-même et se liquéfiait dans l'autre branche B qui était refroidie. Il y a liquéfaction quand la pression dépasse la force élastique maximum correspondant à la température du mélange réfrigérant (*principe de la paroi froide*). Le liquide se rassemble dans la branche froide.

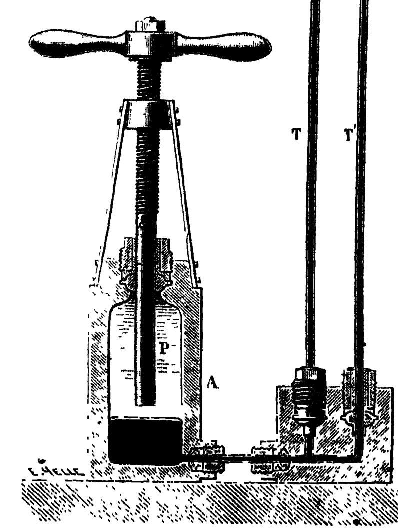


Fig. 300.

Pour la liquéfaction de l'*ammoniaque*, on introduit dans la branche A du chlorure d'argent qui dissout à froid un grand volume d'ammoniaque. On plonge dans un mélange réfrigérant l'extrémité B, après l'avoir préalablement fermée à la lampe. En chauffant A, l'ammoniaque se dégage, exerce sur elle-même une pression qui devient très grande dans le tube et elle se liquéfie.

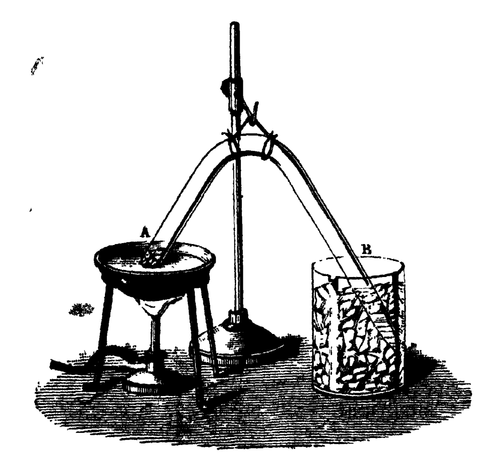


Fig. 301.

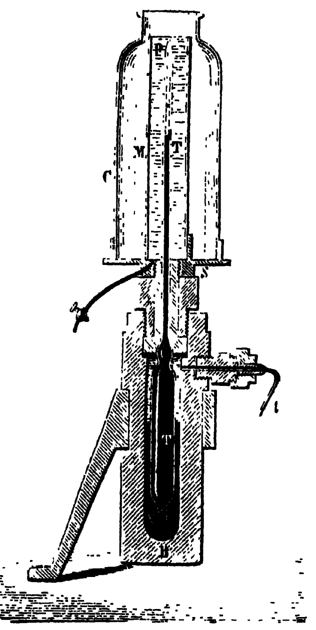


Fig. 302.

L'appareil de liquéfaction de Cailletet (fig. 302), est un tube T de verre épais, recourbé à sa partie inférieure et prolongé en haut par un tube capillaire. Ce tube, rempli de gaz pur et sec, est fermé à sa partie supérieure P; il plonge dans un bain de mercure que contient une cuve en acier B (fig. 302). La cuve communique par un tuyau *t* avec une pompe aspirante et foulante qui injecte de l'eau et transmet une pression au mercure et, par le mercure, au gaz; cette pression est mesurée par un manomètre métallique. Le mercure *comprimé* baisse dans la cuve et s'élève dans la partie supérieure du tube capillaire. Le tube capillaire est entouré d'un manchon M qui contient un mélange *réfrigérant* (fig. 302).

LIQUÉFACTION DES GAZ PERMANENTS

282. Gaz permanents. — Jusqu'en 1877, sept gaz : *oxygène, hydrogène, azote, oxyde de carbone, bioxyde d'azote, formène et acétylène* avaient résisté à des froids de près de — 100° combinés à des pressions de plusieurs centaines d'atmosphères. Ces gaz étaient appelés **permanents**.

L'étude de la compressibilité de l'anhydride carbonique à des températures croissantes, a fait connaître les conditions à remplir pour liquéfier un gaz quelconque.

Courbes isothermiques de l'anhydride carbonique. — Le tracé des courbes isothermiques de l'anhydride carbonique a été déduit d'expériences faites avec un appareil de compression semblable à celui de

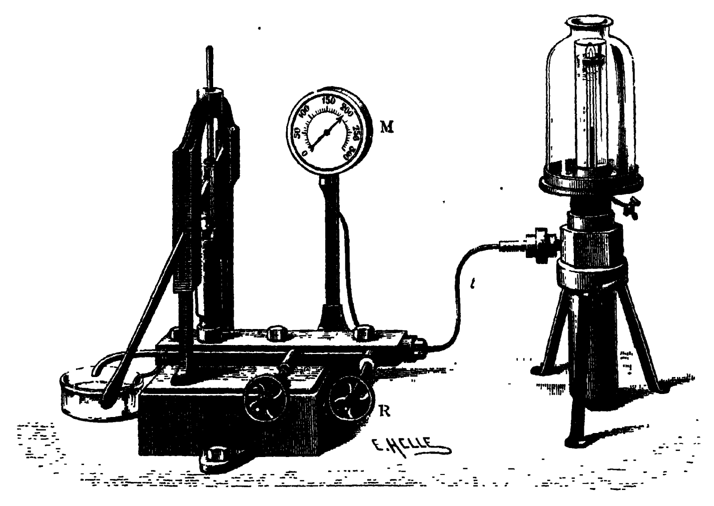


Fig. 303.

Cailletet. Considérons une *masse égale à l'unité*, portons ses volumes sur un axe horizontal et les pressions correspondantes sur des perpendiculaires à cet axe. Chaque état du gaz est figuré par un point particulier (fig. 304).

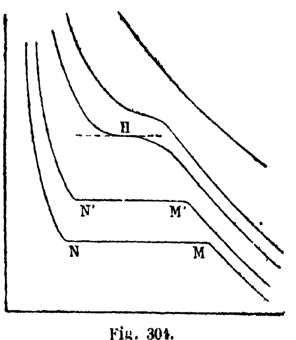


Fig. 304.

I. *Températures inférieures à 31°.* — La courbe de l'état du gaz que l'on comprime progressivement à une température de 15°, par exemple, est une courbe **isothermique** formée de trois parties :

1° Une première partie, *isothermique du gaz*, pour laquelle la liquéfaction n'a pas encore eu lieu et qui s'arrête en M ; le gaz suit alors à peu près la loi de Mariotte.

2° Quand on a réduit suffisamment le volume, une liquéfaction a lieu en M ; elle se poursuit, jusqu'à devenir complète, *à une pression constante* qui est la pression maximum de la vapeur à 15°. La courbe de la liquéfaction est une droite horizontale MN. La longueur MN est la différence des *volumes spécifiques* du gaz et du liquide à 15°. Dans le mélange, le liquide et la vapeur sont *distincts*.

3° Au volume qui correspond au point figuratif N, toute la vapeur a été liquéfiée ; la troisième partie de la courbe, *isothermique du liquide*,

est rapidement ascendante. Par la pression, le volume spécifique du liquide diminue très peu.

Au-dessous de 31°, la courbe isothermique comprend toujours ces trois parties, mais à mesure que la température s'élève et que la pression maximum de la vapeur saturante croît, le segment M'N', égal à la diminution du volume spécifique par la liquéfaction, diminue de longueur.

II. *Température de 31°*. — A 31°, les points M' et N' se confondent en un point unique H. En ce point, la ligne isothermique présente une inflexion et la tangente est parallèle à l'axe des volumes. L'ordonnée du point H est la *pression critique*. L'isothermique de 31° est l'*isothermique critique*. Au-dessous de 31°, la liquéfaction a lieu par une pression inférieure à la pression critique.

III. *Températures supérieures à la température critique*. — Au-dessus de 31°, il n'y a plus liquéfaction, les courbes isothermiques deviennent entièrement continues. A des températures suffisamment élevées, à 50°, par exemple, la courbe isothermique tend à se confondre avec une hyperbole équilatère dont l'équation est $pv = RT$, comme pour un gaz parfait.

283. Température critique. — La pression à laquelle il faut soumettre l'anhydride carbonique pour le liquéfier croît avec la température : c'est 48 atmosphères à 13°, 61 atmosphères à 21°. *Au-dessus de 31°, la liquéfaction n'est plus possible, si forte que soit la pression exercée.* L'intérieur du tube à compression reste alors rempli par un fluide homogène, *sans séparation en deux couches distinctes*. La température de 31° au-dessus de laquelle l'anhydride carbonique ne peut exister qu'à l'état gazeux est appelée sa *température critique*.

Chaque gaz ou vapeur a une température critique.

La température critique sépare gaz et vapeur. — L'anhydride carbonique est appelé vapeur au-dessous de sa température critique et gaz au dessus.

Conditions à réaliser pour liquéfier un gaz. — Les gaz permanents avaient été refroidis et comprimés, mais ils étaient restés au-dessus de leur température critique et, même sous des pressions énormes, ils étaient restés gazeux.

Pour liquéfier un gaz, on doit le *refroidir au-dessous de sa température critique*. Alors on peut le liquéfier de deux manières :

1° A une température suffisamment basse qui est le *point d'ébullition normal* du liquide provenant de la liquéfaction, le gaz se liquéfie sous la *pression atmosphérique*.

2° A une température supérieure au point d'ébullition normal, mais inférieure à la température critique, la liquéfaction s'obtient

par une pression suffisante, supérieure à la pression atmosphérique. Le gaz est amené à l'état de *vapeur saturante*, puis de liquide.

Pour refroidir un gaz, on peut : 1° employer un mélange réfrigérant; 2° évaporer rapidement un liquide; 3° détendre le gaz.

Pour les gaz permanents, les mélanges réfrigérants avaient été insuffisants.

Refroidissement par la détente. — Cailletet eut l'idée de recourir à l'abaissement de température très considérable que peut produire la *détente brusque* d'un gaz, dans une enceinte dont les parois conduisent mal la chaleur. Il a fait usage de l'appareil décrit précédemment (fig. 303) ; le tube capillaire rempli d'un gaz permanent fortement comprimé et parfaitement sec n'était entouré d'aucun mélange réfrigérant, pour rester bien visible; une détente brusque fut produite en ouvrant un robinet R (1). Si la pression tombe de 300 à 1 atmosphère, la température du gaz s'abaisse de plus de 200°. On voit apparaître un *brouillard* dû à des gouttelettes qui proviennent d'une liquéfaction partielle du gaz. Ce brouillard disparaît vite par suite du réchauffement du gaz par les parois du tube. Les gaz réputés permanents ont présenté, dans ces circonstances, des signes très nets de liquéfaction.

284. Liquéfaction persistante des gaz permanents. — Pour obtenir les gaz dits permanents en *masses liquides persistantes,* on a combiné le refroidissement et la compression. Pour obtenir des températures très basses, on a recours le plus souvent à l'évaporation rapide d'un liquide dans le vide. On s'est adressé d'abord aux liquides ordinaires, puis aux gaz liquéfiés.

Avec le chlorure de méthyle, on descend à — 55°. Cette température permet de liquéfier, sous une pression peu élevée, l'éthylène dont la température critique est 9°. Par l'évaporation de l'éthylène liquide on liquéfie l'oxygène. L'évaporation de l'oxygène liquide conduit à — 200°; cette température permet la liquéfaction de l'air sous la pression atmosphérique.

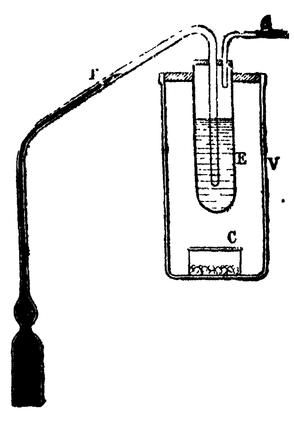


Fig. 305.

L'oxygène a été liquéfié avec l'appa-

(1) Le robinet R se manœuvre avec un volant (fig. 303). A côté, on voit un autre volant qui commande un piston plongeur pour forcer la pression dans l'appareil.

reil Cailletet; le tube était recourbé en T et plongé dans une éprouvette E contenant de l'éthylène liquide que l'on évaporait rapidement en faisant le vide avec une machine pneumatique (fig. 305) [1]. Le tube est ainsi refroidi au-dessous de la température critique de l'oxygène qui est — 116°. L'oxygène devient un liquide transparent. La liquéfaction a lieu à — 132°, par une pression de 25 atmosphères, supérieure à la force élastique maximum de l'oxygène à cette température.

	Température critique	Pression critique	Point d'ébullition normal
Azote	— 145°	35 atm.	— 194°
Oxygène	— 116°	50	— 181°
Anhydride carbonique	+ 31°	77	— 78°
Anhydride sulfureux	+ 156°	79	— 10°
Alcool éthylique	+ 243°	64	+ 78°,
Eau	+ 365°	195	+ 100°

L'hélium a été liquéfié à une température de — 268°.

Solidification des gaz. — Les gaz ont été solidifiés en les soumettant à des froids extrêmement énergiques. L'oxygène a été solidifié dans l'hydrogène liquide porté à l'ébullition à — 241° sous la pression atmosphérique. L'hydrogène lui-même a été solidifié.

Un gaz liquéfié qu'on laisse revenir à une température ordinaire, détermine sur les parois du réservoir qui le renferme une pression égale à sa force élastique maximum à cette température. A 13°, la pression exercée par l'anhydride carbonique liquide est de 48 atmosphères. En ouvrant le robinet du cylindre en acier qui contient l'anhydride carbonique liquide, il sort un jet de gaz très vif et cette vaporisation produit un froid tel que le gaz qui sort se solidifie partiellement en forme de neige.

285. Continuité de l'état liquide et de l'état gazeux. — A mesure qu'on se rapproche du point critique, les propriétés physiques du liquide et du gaz (*densité, dilatation, indice de réfraction*) tendent à se confondre. Au point critique, la *surface de séparation entre le liquide et sa vapeur disparaît.*

Un tube scellé, à parois épaisses, renfermant de l'acide carbonique liquide, offre à basse température une séparation nette du liquide et de sa vapeur. A 30°, la surface libre du liquide devient incertaine; elle disparaît à 31°, et au-dessus on n'a plus qu'un seul fluide d'apparence uniforme. Le liquide reparaît au-dessous de 31°.

(1) Autour de l'éprouvette, on met en C du chlorure de calcium qui empêche un dépôt de rosée sur le tube et permet de voir le liquide.

Courbe de saturation. — Les droites de liquéfaction MN, M'N' (fig. 304), diminuent de longueur à mesure que la température se rapproche de la température critique. Si l'on joint par un trait continu, d'une part, les points M,M'... du début et, d'autre part, les points N,N'... de la fin de la liquéfaction, on forme deux arcs qui se réunissent en H où la tangente est horizontale.

La courbe (fig. 306) MM'... H... N'N qui joint les extrémités des droites de liquéfaction est appelée courbe de saturation. Elle sépare *deux régions* du plan où la substance a des propriétés différentes. Dans la *région intérieure* B, le fluide peut exister simultanément sous deux états *distincts* : gazeux et liquide, *sans former un fluide homogène*. La température et la pression ne variant pas, le volume du corps est alors indéterminé, compris entre le volume de la vapeur saturante (point M) et le volume du liquide (point N).

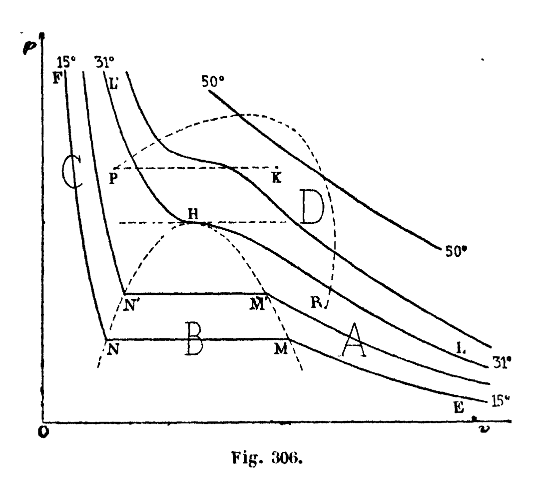


Fig. 306.

Dans la *région extérieure*, un seul volume correspond à une température et à une pression déterminées. De plus, la substance se présente constamment *sous la forme d'un fluide homogène* et, si l'on va d'un point R à un point P du plan sans traverser la courbe de saturation, l'instant du passage de l'état liquide à l'état gazeux n'est pas perceptible ; il y a, dans le trajet, *continuité de l'état gazeux et de l'état liquide* (1).

286. Air liquide. — Des machines spéciales, fondées sur l'emploi de la détente, permettent de liquéfier l'air industriellement, en le refroidissant au-dessous de son point critique qui est — 140°.

L'air liquide est transparent, très mobile. Il ne peut pas être conservé, comme l'anhydride carbonique, dans des réservoirs en acier (2),

---

(1) En considérant, en même temps que la courbe de saturation, la courbe isothermique de la température critique, le plan se partage en quatre régions : 1° région A, au-dessous de l'isothermique critique et à droite de la courbe de saturation, où le corps est gazeux, mais liquéfiable à température constante, en élevant la pression ; 2° région B, intérieure à la courbe de saturation, où la vapeur est partiellement liquide ; 3° région C, au-dessous de l'isothermique critique et à gauche de la courbe de saturation où la substance est liquide et peut devenir vapeur à température constante, en abaissant la pression ; 4° région D, au-dessus de la température critique, où le gaz n'est plus liquéfiable par accroissement de pression.

(2) La plupart des gaz liquéfiés industriellement ont des températures critiques, supérieures à la température ordinaire : l'acide carbonique, le chlorure de méthyle, l'ammo-

car la communication de la chaleur extérieure par la paroi métallique élèverait rapidement la température jusqu'au point critique. Devenu dès lors complètement gazeux, 1 volume d'air liquide produirait 750 volumes de gaz à 0° et aucun récipient ne résisterait à la pression du gaz (environ 750 kg. par centimètre carré).

Un ballon ouvert, en verre ordinaire, offre encore une conductibilité trop grande, même si l'on entoure le verre de feutre ou de liège, et l'évaporation du liquide reste rapide. Il ne s'évapore que lentement si on le conserve dans un vase ouvert à double enveloppe (fig. 307) formé de deux ballons concentriques en verre mince soufflé, entre les parois desquels on a fait un vide rigoureux. La double enveloppe est argentée sur ses deux faces à l'intérieur de sa cavité [1].

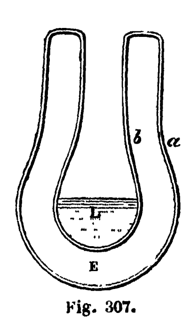


Fig. 307.

L'air liquide sert à obtenir de très basses températures [2]. Une goutte d'air liquide versée sur un peu de mercure le transforme immédiatement en un bloc solide. Si l'on plonge dans de l'alcool un tube renfermant de l'air liquide, l'alcool se solidifie. Du fer maintenu quelques minutes dans l'air liquide s'effrite au moindre choc. Le cuivre reste malléable.

L'air liquide est surtout une source commode d'oxygène ou d'azote. Il constitue, en effet, un mélange d'oxygène et d'azote liquides, qu'on distille à la façon d'un mélange d'alcool et d'éther : l'oxygène bout à — 181°, et l'azote à — 194° (sous la pression 76) [3]. Les premières parties du gaz obtenu sont de l'azote presque pur. Le liquide restant s'enrichit de plus en plus en oxygène.

HYGROMÉTRIE

287. Vapeur d'eau de l'atmosphère. — Une évaporation

niaque, le chlore, se conservent liquides, sous pression, dans des tubes métalliques très résistants, fermés par des robinets à pointeau.

(1) La minceur des parois du verre réduit la transmission de chaleur par conductibilité, le vide évite le transport de chaleur d'une paroi à l'autre par des convections gazeuses, l'argenture supprime l'apport de chaleur par rayonnement.

(2) Malgré sa basse température, l'air liquide n'est pas d'un emploi très avantageux comme réfrigérant, car sa chaleur de vaporisation est peu considérable ; il ne constitue pas non plus une source d'énergie importante.

(3) Dans un vase ouvert, l'air liquide s'évapore doucement. Quand il ne reste plus que peu de liquide, c'est un mélange d'argon, de krypton, de xénon et de néon. La distillation fractionnée de l'air liquide permet d'isoler les gaz qui accompagnent l'argon dans l'atmosphère : d'abord l'hélium et le néon dont les liquides sont plus volatils, puis le crypton et le xénon dont les liquides sont moins volatils.

incessante, à la surface des masses d'eau du globe, fournit à l'atmosphère de grandes quantités de vapeur d'eau qui se trouvent à l'état de *nuages* dans les hautes régions et à l'état invisible autour de nous. La vapeur d'eau invisible se condense sur une carafe froide, sur la face intérieure des vitres d'une chambre en hiver; elle augmente le poids de la chaux vive et de l'acide sulfurique.

La masse de vapeur d'eau de l'atmosphère est *variable;* elle influe sur beaucoup de phénomènes : formation des brouillards, des nuages, de la rosée, évaporation chez les végétaux et les animaux, etc. Ces phénomènes ne dépendent pas seulement de la masse m de vapeur d'eau contenue dans chaque unité de volume d'air à un instant donné, mais aussi de la masse M qui y serait contenue, à la même température, si l'air était saturé. On dit que l'air est *humide* quand la différence $M - m$ est petite, et un petit abaissement de température détermine une condensation de vapeur; l'air est dit *sec* dans le cas contraire, il provoque alors l'évaporation de l'eau.

288. But de l'hygrométrie. — L'hygrométrie a pour objet de déterminer *la masse de vapeur d'eau contenue,* à un moment donné, *dans un volume d'air connu.*

État hygrométrique. — Le rapport $\frac{m}{M}$, qui existe entre la masse actuelle m et la masse M qui serait contenue dans le même volume d'air saturé, à la même température, caractérise l'état d'humidité de l'air; on l'appelle *état hygrométrique de l'air.*

Dans l'air saturé $\frac{m}{M} = 1$; dans l'air absolument sec $\frac{m}{M} = 0$.

La vapeur d'eau exerçant, pour sa part, dans le mélange atmosphérique, une force élastique f, la masse m de vapeur contenue dans un volume V d'air à la température t a pour valeur :

$$m = \frac{V}{1 + \alpha t} \cdot \frac{f}{76} 0,001293.0,622.$$

La vapeur d'eau saturante qui serait contenue dans le volume V, à t^0, exercerait la force élastique maximum F; sa masse est :

$$M = \frac{V}{1 + \alpha t} \cdot \frac{F}{76} 0,001293.0,622.$$

D'après la proportion $\frac{m}{M} = \frac{f}{F}$, l'état hygrométrique de l'air est le rapport entre la pression actuelle f de la vapeur d'eau dans l'air et la pression F de la vapeur saturante à la même température.

Hygromètres. — Les hygromètres servent à mesurer, soit la

masse *m* de vapeur d'eau contenue dans un volume d'air connu, soit la force élastique *f* de cette vapeur. Les tables des forces élastiques maxima de la vapeur d'eau donnent F.

289. Hygromètre chimique. — La méthode chimique consiste à absorber, au moyen de réactifs chimiques, la masse *m* de la vapeur d'eau contenue dans un volume d'air connu.

Appareil (fig. 308). — Des tubes desséchants, en forme d'U, communiquent, par un tube *c*, avec l'enceinte dont on cherche le degré d'humidité. Ces tubes sont traversés par un courant d'air appelé par un *aspirateur* V. L'aspirateur est un vase cylindro-conique d'une cinquantaine de litres, portant à sa partie inférieure un robinet *r* et à sa partie supérieure un tube *a* qui descend jusqu'au fond du vase et le relie aux tubes desséchants. En faisant écouler l'eau de l'aspirateur par le robinet *r*, le vide laissé par l'eau est comblé par l'air extérieur, qui gagne l'aspirateur après s'être dépouillé de sa vapeur d'eau dans les tubes *desséchants* C, D, E, F, remplis de pierre ponce imbibée d'acide sulfurique (1).

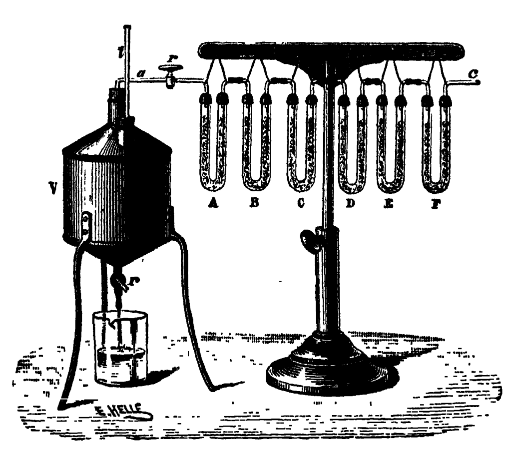


Fig. 308.

Expérience. — On fait d'abord la tare des tubes C, D, E, F, puis on fait couler lentement l'eau de l'aspirateur et on la recueille dans un *vase gradué*. Quand l'écoulement a cessé, on reporte les tubes C, D, E, F sur la balance : leur augmentation de poids en grammes est la masse *m* de vapeur d'eau de l'air qui a traversé les tubes.

Calcul. — Appelons V le volume que la vapeur d'eau *occupait* dans l'enceinte où elle a été puisée, *f* la force élastique qu'elle y exerçait; on a :

$$m = \frac{V}{1 + \alpha t} \cdot \frac{f}{76}\ 0{,}001293.0{,}622.$$

(1) Un tube *témoin* B qui ne doit pas varier de poids, indique que toute l'humidité a été cédée aux quatre premiers tubes. Un tube A que l'on ne pèse pas, retient l'humidité qui pourrait, par accident, refluer de l'aspirateur.

Dans le volume V, l'*air sec* qui accompagnait la vapeur à la température t, avait une force élastique $H - f$. Cet air s'est saturé d'humidité dans l'aspirateur, y a acquis une température t' indiquée par le thermomètre, une force élastique $H - F$ et un volume U ; le volume U est le volume de l'eau écoulée dans le vase gradué.

La relation $\frac{V(H-f)}{1+\alpha t} = \frac{U(H-F)}{1+\alpha t'}$

fait connaître V ; en portant la valeur de V dans l'expression de la masse m, on a une équation d'où l'on déduit f.

L'air doit circuler très lentement dans les tubes et l'expérience doit être assez longue pour fournir un accroissement de poids appréciable ; toutefois, cette méthode ne fait connaître que la *force élastique moyenne* pendant la durée de l'écoulement.

290. Hygromètres de condensation. — Les hygromètres à condensation mesurent directement f.

Principe de la méthode. — On place dans l'air un verre rempli d'eau que l'on refroidit. A son contact, la température des couches d'air voisines s'abaisse graduellement jusqu'à une température t' à laquelle la vapeur d'eau environnante devient saturante, et le moindre refroidissement au-dessous de t' suffit alors pour produire un dépôt de rosée sur la surface extérieure du vase. L'air *s'est refroidi sans changement de la force élastique de sa vapeur* et la force élastique maximum à la température t' est égale à la force élastique f que la vapeur d'eau exerçait primitivement à la température t. Plus l'air environnant est sec, plus il faut refroidir le vase pour que la vapeur d'eau devienne saturante.

L'hygromètre fait connaître t' ; la table des forces élastiques maximum donne f.

La température t'_1, observée pour le dépôt de rosée, est légèrement inférieure à la température vraie t', car le dépôt commençant un peu avant qu'il soit aperçu, on a continué à refroidir le vase. En laissant le vase se réchauffer, la vapeur d'eau condensée sur sa surface disparaît ; la température de disparition t'_2 est un peu supérieure à t', car la disparition a commencé un peu avant qu'elle fût manifeste. On prend pour t' la moyenne $\frac{t'_1 + t'_2}{2}$, qui est très voisine de t', si t'_1 et t'_2 diffèrent peu.

Hygromètre d'Alluard. — Le dépôt de rosée se fait sur une face plane A bien polie et dorée d'une petite caisse prismatique en métal mince. Cette face plane est encadrée par une lame polie et dorée O qui ne la touche pas. Le vase A contient de l'éther. A l'aide d'un soufflet, on insuffle de l'air par le tube HD qui plonge dans l'éther ;

l'air et la vapeur d'éther sortent par un autre tube CG (fig. 309). L'évaporation de l'éther amenant le refroidissement de la face A, un dépôt de rosée s'y produit et donne une teinte mate au métal; la lame qui l'encadre sans la toucher n'est pas refroidie et conserve son brillant; la *comparaison* constante des deux lames juxtaposées fait saisir, par contraste, l'apparition et la disparition du dépôt.

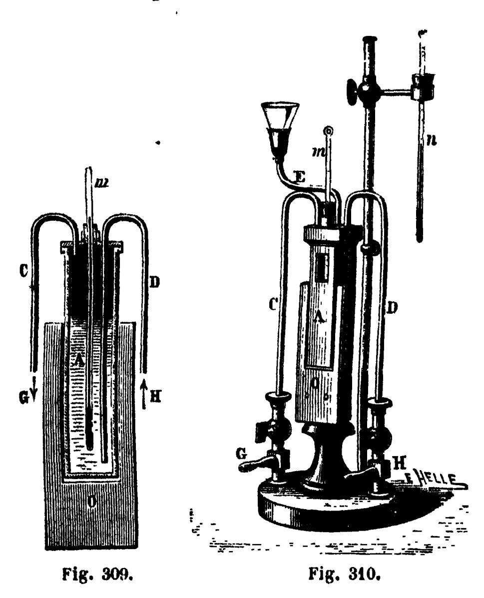


Fig. 309. Fig. 310.

Un thermomètre intérieur marque la température de l'éther et de la face A, un thermomètre extérieur donne la température de l'air ambiant (fig. 310). On observe

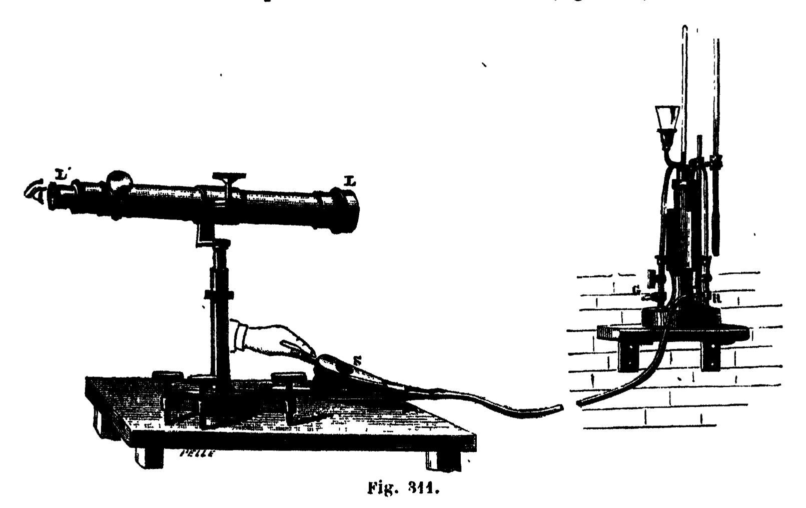


Fig. 311.

les thermomètres et la face de la caisse avec une lunette qui éloigne l'observateur et la vapeur d'eau qu'il exhale (fig. 311) (1).

---

(1) En air calme, cet hygromètre est exact; au vent, la vitesse d'évaporation sur la lame A peut être assez grande pour que la rosée n'apparaisse plus.

291. Hygromètres d'absorption. — Un grand nombre de substances animales et végétales, dites *hygrométriques*, augmentent de volume en absorbant par imbibition la vapeur d'eau de l'air. Le cheveu est très sensible à l'influence de l'humidité, il s'allonge (1) dans l'air humide et se raccourcit dans l'air sec.

Hygromètre à cheveu de Saussure. — Un cheveu bien dégraissé (fig. 312), long d'environ 30 centimètres, est fixé à son extrémité supérieure F dans une pince et à son extrémité inférieure sur l'une des gorges d'une poulie à double gorge D. Sur la seconde gorge de la poulie s'enroule un fil de soie terminé par un poids p qui tend le cheveu. L'axe de la poulie est muni d'une aiguille C dont la pointe se meut sur un cadran divisé AB. L'aiguille s'abaisse quand le cheveu s'allonge et se relève quand il se raccourcit. L'aiguille est équilibrée par un contrepoids e; le centre de gravité du système mobile se trouvant sur l'axe de rotation, l'aiguille reste en équilibre dans toutes les positions.

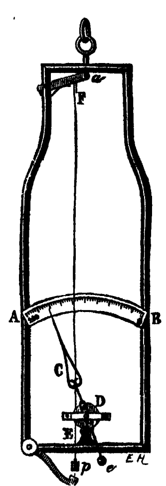


Fig. 312.

On porte l'instrument dans une cloche pleine d'air desséché par l'acide sulfurique concentré, et on marque 0 au point où s'arrête l'aiguille. On marque 100 au point où elle s'arrête dans une cloche saturée d'humidité. L'intervalle est divisé en 100 parties égales, dites *degrés de l'hygromètre*. On gradue l'instrument en le plongeant successivement dans des enceintes où la force élastique de la vapeur d'eau est connue (force élastique maximum à diverses températures) et en notant les positions de l'aiguille.

ÉQUILIBRES PHYSIQUES

292. Un ensemble ou système de corps est dit *en équilibre*, quand aucune de ses parties ne subit de modification. Son équilibre dépend de différents facteurs variables : température, pression, volume, etc.

Équilibre stable. — Un équilibre est *stable* si une modification infiniment petite du système est apportée par une variation infiniment petite Δx d'une variable x et si le retour à l'état initial est rétabli par une variation $-\Delta x$ égale et contraire. Cette modification est *réversible*.

Équilibre instable. — Un équilibre est instable lorsque, une variation infiniment petite Δx d'une variable produit une modification notable du système et que, la variation égale et contraire $-\Delta x$ ne ramène pas à l'état initial. La modification est alors *irréversible*.

---

(1) Dans l'imbibition ou la pénétration d'un liquide dans un solide, il y a accroissement de volume du solide. Si les cordes formées de fibres tordues se raccourcissent quand on les mouille, il y a néanmoins augmentation de volume, car leur diamètre augmente.

Un système est dit **invariant,** si son état d'équilibre se maintient dans des *conditions fixes*, sans qu'on en puisse faire varier aucune.

Un système est dit **univariant** si son état d'équilibre et toute propriété du système, pendant l'équilibre, dépend *d'une variable* et d'une seule.

Un système est **divariant** si son équilibre et toute propriété du système pendant l'équilibre est fonction de *deux variables* indépendantes.

Phases. — Dans l'étude des équilibres, on appelle phase une forme homogène sous laquelle se présente un corps ou un système de corps. Un mélange homogène d'azote, d'oxygène et de vapeur d'eau dans l'air, ne constitue qu'une phase. Une solution non saturée constitue une phase, une solution saturée au contact d'un excès du solide comprend deux phases : la solution et le solide non dissous.

Appliquée à un corps unique, l'expression phase se confond souvent avec l'expression état. La *fusion* d'un corps est le passage d'une phase solide à une phase liquide ; la *vaporisation,* d'une phase liquide à une phase gazeuse ; la *sublimation,* d'une phase solide à une phase gazeuse. Un mélange d'eau, de glace et de vapeur d'eau constitue trois phases : une phase liquide (eau), une phase solide (glace), un phase gazeuse (vapeur d'eau). Toutefois, phase et état peuvent, pour un même corps, être distincts, ainsi le phosphore se présente sous deux phases solides : phosphore blanc et phosphore rouge.

ÉQUILIBRE D'UN CORPS PUR SOUS UNE SEULE PHASE

Un *corps est dit pur* s'il ne peut, quelle que soit l'action physique à laquelle on le soumet, donner autre chose que ce corps lui-même.

293. Un corps pur, liquide ou gazeux, pris tout entier sous une même phase, est *divariant.*

Une masse de gaz, *maintenue à température constante*, et enfermée dans un corps de pompe où glisse un piston, prend une force élastique qui varie avec le volume qu'on lui donne. En même temps que sa force élastique, ses autres propriétés varient (densité, indice de réfraction, conductibilités, etc.). Le gaz est en équilibre stable, car il reprend les mêmes propriétés quand on lui rend le même volume. La relation entre la pression et le volume, à une température constante, est représentée par une courbe dite *isothermique.*

Pour une température différente, on a une autre courbe isothermique. On trace les courbes isothermiques du gaz dans un plan où l'on a pris pour axes de coordonnées la pression et le volume ; pour des gaz *parfaits*, elles ont la forme $pv = RT$, où $T = 273 + t$.

Un point du plan correspond à un état particulier du gaz et il suffit de donner *deux variables* pour que la troisième soit déterminée ; *l'état du gaz est bien fixé par deux variables indépendantes.* Supposons que l'on se donne, par exemple, le volume v et la température t. On prend sur l'axe des abscisses une longueur Om égale à v, on mène par le point m une ordonnée que l'on prolonge jusqu'à la courbe isothermi-

que de température t (fig. 313). La longueur de l'ordonnée mM est la pression ; M est le point figuratif de l'état du gaz.

Pour tout corps pur, liquide ou gaz, pris sous une seule phase, ses propriétés restent constantes et il est en équilibre physique tant que deux des trois variables p, v et t sont maintenues fixes. Il y a une relation entre sa pression, son volume et sa température. Cette relation est $pv = RT$ pour les gaz parfaits ; pour les gaz réels, c'est l'équation de Van der Waals. Si l'une des variables est maintenue constante, par ex. la température, le corps devient, dans ces conditions, univariant (1).

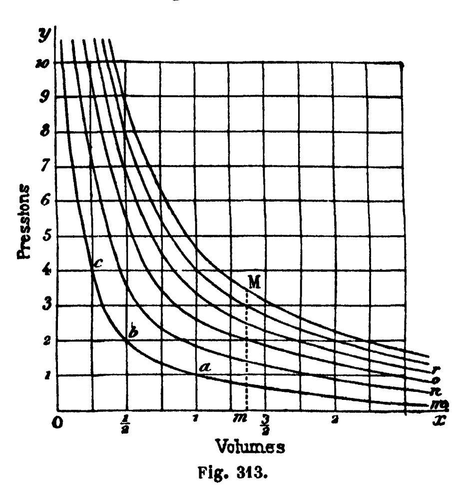


Fig. 313.

ÉQUILIBRE D'UN CORPS PUR SOUS DEUX PHASES

Lorsque deux phases d'un corps pur *coexistent en équilibre*, toute propriété physique de chacune des phases ne dépend que d'une seule variable indépendante ; le système est *univariant.*

294. PHASE LIQUIDE ET PHASE GAZEUSE. — A une certaine température, dans un mélange d'un liquide et de sa vapeur, on peut faire varier à volonté les *proportions relatives* de liquide et de vapeur, pour une valeur particulière de la pression exercée sur le mélange et donnée par une relation $p = f(t)$ variable avec la nature du corps. Conformément à la relation $p = f(t)$, l'état de chacune des parties du mélange ne dépend que d'une seule variable indépendante, la température ou la pression ; le volume total peut prendre une infinité de valeurs comprises, à la température de l'expérience, entre deux limites V_1 et v_1 (V_1 volume de la masse considérée entièrement réduite en vapeur, v_1 volume de la masse entièrement liquéfiée). Si, en maintenant la température t_1 constante, on élève la pression au-dessus de la pression correspondante p_1, tout le mélange devient graduellement liquide ; si on l'abaisse, tout le mélange devient graduellement gazeux.

A une température t, sous la pression correspondante p, le système est

(1) Les propriétés d'un *fluide*, gaz ou liquide, ne dépendent que de son état actuel quelle que soit la série des opérations par lesquelles on l'y a amené. Ainsi, de l'hydrogène, de l'eau, *à une température t et à une pression p*, sont des corps parfaitement définis, il en est de même sensiblement pour certains corps cristallisés, tels que le quarz et la glace. Mais, les propriétés des solides, en général, ne dépendent pas seulement de leur état actuel, mais aussi de leurs états antérieurs ; une température et une pression déterminées ne suffisent pour caractériser l'état du verre, du fer, du cuivre.

en équilibre stable et ses transformations sont *réversibles*, susceptibles d'être produites à volonté dans les deux sens; soit que, à température constante, on élève ou on abaisse la pression; soit que, à pression constante, on abaisse ou on élève la température.

Représentation graphique. — Pour tracer la courbe des pressions d'équilibre aux diverses températures, on prend dans un plan les températures comme abscisses et les pressions comme ordonnées. Un point du plan représente l'état d'une certaine masse du corps, par exemple un gramme.

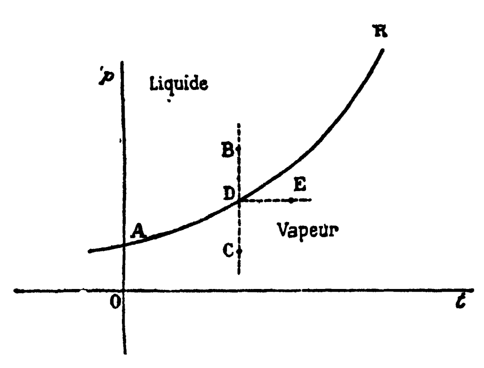


Fig. 314.

Sur le trajet de la *courbe de vaporisation* $p = f(t)$ (fig. 314), le corps est en équilibre à la fois à l'état liquide et à l'état de vapeur. Cette courbe AD divise le plan en deux régions : l'une au-dessus de la courbe pour laquelle la substance est entièrement liquide, la pression étant supérieure à la pression p d'équilibre de la température t; l'autre au dessous, entre la courbe et l'axe des abscisses, où la substance est entièrement vaporisée, la pression étant inférieure à la pression d'équilibre pour la même température.

Dans la région supérieure ou dans la région inférieure, le corps pur étant tout entier sous une même phase, son état dépend de deux variables indépendantes.

Point d'arrêt de la courbe de vaporisation. — La courbe $p = f(t)$ s'arrête à un point R dont les coordonnées sont : une température qu'on appelle la *température critique* et une pression dite *pression critique*. Dans le cas de l'anhydride carbonique, les coordonnées de ce point sont 31° et 77 atmosphères. Ce point représente l'état limite d'un mélange où l'anhydride carbonique gazeux et l'anhydride carbonique liquide sont en contact et distincts à une pression d'équilibre; au delà de ce point, le liquide et le gaz ne sont plus distincts.

295. PHASE SOLIDE ET PHASE LIQUIDE. — Dans un mélange d'un solide et de son liquide (par exemple glace et eau), à une température t de fusion du solide, sous une pression qui est liée à la température par une relation $p = F(t)$, le solide et le liquide peuvent coexister en contact, en proportions relatives quelconques. Le volume total de la masse considérée peut prendre une infinité de valeurs, qui sont comprises à la température de l'expérience, entre le volume de la masse entièrement liquide et son volume à l'état solide. La relation $p = F(t)$ dépend de la nature de la substance, l'état de chacune des parties du mélange ne dépend que d'une seule variable : température ou pression.

A une température t, sous la pression correspondante p, le système

est en équilibre stable et ses transformations sont *réversibles,* susceptibles d'être produites à la fois dans les deux sens ; soit que, à température constante, on élève ou on abaisse la pression ; soit que, à pression constante, on abaisse ou on élève la température. Si, par exemple, en maintenant la température t_1 constante, on élève la pression au-dessus de la pression correspondante p_1, tout le mélange (glace et eau) devient graduellement liquide ; si on l'abaisse, tout le mélange devient solide.

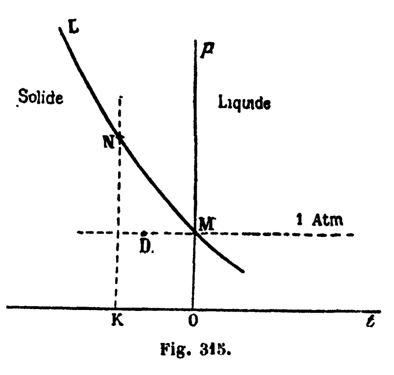
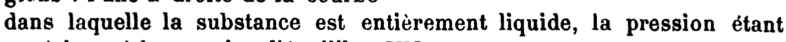


Fig. 315.

Représentation graphique. — Sur le trajet de la courbe de fusion $p = F(t)$, le corps est en équilibre en proportions relatives quelconques, à l'état solide et à l'état liquide. La courbe AL (fig. 315), relative à l'eau, divise le plan en deux régions : l'une à droite de la courbe


dans laquelle la substance est entièrement liquide, la pression étant supérieure à la pression d'équilibre KN pour la température OK ; la région de gauche est la région de la phase solide.

Pour la plupart des substances, l'orientation de la courbe d'équilibre est différente (fig. 316) ; ainsi la courbe de la benzine tourne sa convexité vers la région du liquide.

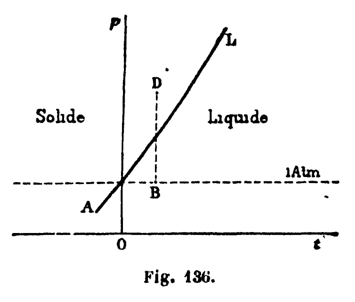


Fig. 136.

296. PHASE SOLIDE ET PHASE GAZEUSE. — Un corps solide peut présenter le phénomène de la *sublimation,* c'est-à-dire passer directement de l'état solide à l'état gazeux ou inversement de l'état gazeux à l'état solide sans se liquéfier. A la pression ordinaire, le camphre, l'iode, la glace sont dans ce cas.

A chaque température, une vapeur au contact de son solide a une *pression d'équilibre* pour laquelle *les proportions relatives* de la vapeur et du solide dans le mélange peuvent rester indéfiniment *quelconques* sans se modifier ; pour la glace et sa vapeur à 0°, cette pression est voisine de 4 millimètres de mercure.

La pression d'équilibre dépend de la nature de la substance et, pour un corps particulier, elle n'est fonction que de la température ; la courbe des pressions est appelée *courbe de sublimation.*

Dans la figure 317, la courbe de sublimation est la courbe AS ; elle sépare dans le plan la région de la vapeur et la région du solide.

***En résumé,* un corps pur étant pris sous deux phases coexistantes en équilibre, l'équilibre est indépendant des masses en présence et une seule des variables, pression ou température, peut être prise arbitrairement.** — L'état du mélange est défini par une

variable *indépendante,* mais les proportions relatives à chacun des deux états ne sont pas déterminées. Deux phases d'un même corps ne peuvent coexister en contact, à une température déterminée, que pour une pression spéciale, tandis qu'un corps qui est tout entier sous une même phase, à une température donnée, y reste pour une infinité de pressions.

ÉQUILIBRE D'UN CORPS SOUS TROIS PHASES

297. Point triple. — Les trois courbes de vaporisation, de fusion et de sublimation se coupent, pour un corps, *en un même point.* Ce point est appelé point *triple.* En d'autres termes, il y a une température et une pression *invariables pour lesquelles* les trois états d'un même corps pur peuvent être mélangés et en équilibre, quelles que soient les proportions relatives des trois états. L'état d'équilibre pour les trois phases se maintient pour les conditions qui correspondent au point A. En ce point, le système est *invariant,* il n'y a pas de variable indépendante. Pour tous les autres points figuratifs, un équilibre des trois états est impossible. Les trois courbes partagent le plan en trois régions, qui correspondent aux trois phases. Dans chacune des régions, le corps est divariant; sur les courbes il est univariant. Les trois courbes AM, AL et AS de la figure 317 ont une forme qui convient à l'eau (1).

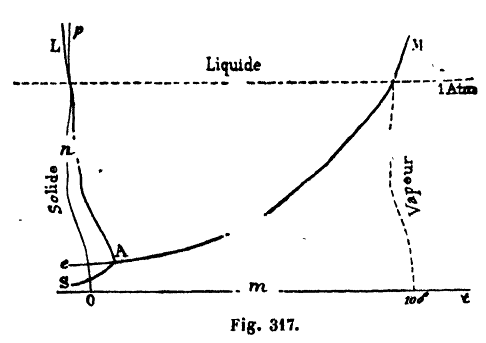


Fig. 317.

FAUX ÉQUILIBRES

Les règles énoncées pour l'équilibre d'un corps pur s'appliquent aux équilibres stables; mais il existe des équilibres *instables,* appelés aussi

(1) *Conditions de la sublimation.* — Quand on chauffe une substance *solide* sous une pression constante, supérieure à la pression ϖ de son triple point, le point figuratif de l'état du corps part de la région du solide, se déplace parallèlement à l'axe des températures, avec une ordonnée supérieure à ϖ, il coupe la courbe AL au moment de sa fusion, reste liquide dans la région du liquide, coupe la courbe AM au moment de sa vaporisation et reste ensuite gazeux.

Si l'on chauffe le même corps *solide* sous une pression constante, inférieure à la pression ϖ de son triple point, le point figuratif part de la région du solide, se déplace parallèlement à l'axe des températures avec une ordonnée inférieure à ϖ, il ne peut couper la courbe AL, il ne coupe que la courbe AS de sublimation et se vaporise par conséquent sans fondre. C'est ainsi que l'*arsenic*, à l'air libre, passe directement à l'état gazeux, sans devenir liquide; en effet, la pression de son triple point est supérieure à 760 millim. En chauffant l'arsenic dans un tube scellé, l'accroissement de pression dû à la vapeur porte la pression au-dessus de la pression ϖ et on obtient l'arsenic liquide.

faux équilibres, qui concernent un corps pris sous une seule phase; ils se manifestent sous la forme de retards à un changement d'état.

298. Retard à la vaporisation. — A une température donnée, un tube à vapeur étant rempli, à sa partie supérieure, de liquide privé de gaz, on peut le soulever sans qu'il y ait vaporisation; le mercure monte, la pression supportée par le liquide diminue et prend une valeur p' qui peut être inférieure à la pression d'équilibre déduite de la pression $p = f(t)$. La substance est ainsi maintenue liquide en C dans la région de la vapeur au-dessous du point D (fig. 314). L'introduction d'une bulle d'air dans le *liquide provoque la vaporisation instantanée.*

Le retard à la vaporisation s'observe souvent sous la forme de *retard à l'ébullition*, lorsque, la pression restant la pression atmosphérique, le liquide est porté sans se vaporiser à une température t_1 supérieure à la température t d'équilibre de la relation $p = f(t)$. Ce second mode de *retard à la vaporisation revient à un déplacement DE du point figuratif,* parallèlement aux abscisses, vers les températures croissantes.

Quand la vaporisation a commencé, elle se poursuit jusqu'à ce que la vapeur atteigne, soit la pression d'équilibre à la température de l'expérience, soit la température d'équilibre à la pression atmosphérique, suivant le mode de déplacement du point figuratif.

299. Retard à la liquéfaction. — A une température t on soulève un baromètre à vapeur de façon à vaporiser d'abord complètement le liquide, puis on descend à une pression p' inférieure à la pression p d'équilibre de la relation $p = f(t)$ spéciale au corps considéré. La vapeur étant alors *sèche* et *exempte de poussières,* on enfonce le tube pour comprimer la vapeur. On peut alors dépasser la pression d'équilibre p sans qu'il y ait liquéfaction (1). La substance se trouve ainsi maintenue gazeuse en B dans la région du liquide, au-dessus de D (fig. 314).

Lorsque, à un certain moment, la liquéfaction commence, elle se poursuit jusqu'à ce que la pression retombe à la pression p d'équilibre.

300. Retard à la solidification. — La *surfusion* (**249**) est un faux équilibre, c'est ainsi que l'eau peut rester liquide au-dessous de 0^0, de M en D (fig. 315). Si l'on introduit une parcelle du corps à l'état solide, dans la substance maintenue liquide par surfusion au-dessous de son point de solidification normal, une solidification a lieu. La solidification dégage de la chaleur et la température se relève. La solidification s'arrête quand la température du mélange est devenue égale à la température de fusion sous la pression exercée sur le mélange.

Les faux équilibres sont irréversibles. — Un équilibre stable est caractérisé par la *réversibilité.* Les faux équilibres sont instables; les transformations qui y conduisent sont irréversibles. Ainsi on atteint un équilibre de surfusion par refroidissement; mais, quand la surfusion a cessé, on ne peut pas y revenir par réchauffement.

Les faux équilibres n'ont pas lieu quand deux phases sont en présence.

(1) Les poussières et la vapeur sont des centres autour desquels la vapeur se condense.

ÉQUILIBRE D'UNE SOLUTION

301. *Solution saturée.* — Quand une solution est *saturée*, une addition du corps solide n'augmente pas la proportion du solide dissous; il reste solide au contact de la solution. Le système comprend deux phases : la solution saturée et le solide non dissous. Sous une pression déterminée, la *concentration* ou la proportion du solide dissous ne dépend que de la température.

A pression constante, l'état de la solution peut être représenté par un point d'un plan où sont tracés un axe des températures et un axe des concentrations. La *courbe de solubilité* est une courbe d'équilibre pour une solution saturée; un état de saturation correspond à un point M de température t et de concentration c. Si la température s'abaisse, la solution laisse déposer du solide et la concentration diminue, un nouvel équilibre s'établit sur la courbe pour un point M', au-dessous de M (fig. 317 *bis*). Si la température s'élève au-dessus de t, la concentration augmente et un équilibre s'établit sur la courbe pour un point M″, au-dessus de M. Sur la courbe M″MM', la solution constitue un système *univariant* avec deux phases en présence, l'état du système *ne dépendant que d'une variable* c ou t; l'autre variable est donnée par l'équation $c = f(t)$ de la courbe de solubilité ou de concentration maximum. La courbe $c = f(t)$ est, aux diverses températures une courbe d'équilibre, pour le système des deux phases : *solution saturée et solide en excès.*

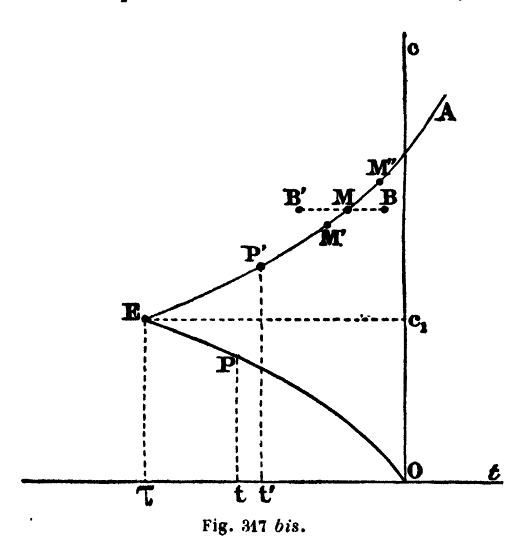


Fig. 317 *bis.*

Supposons que, pour une solution, on élève la température jusqu'à ce que tout le solide soit dissous et qu'on arrive ainsi à un point M; si on élève encore la température, la concentration ne peut plus augmenter, le point figuratif se déplace alors de M en B, parallèlement à l'axe des températures, mais la solution n'est plus saturée. La courbe de solubilité partage le plan en deux régions; la région de droite où se trouve B est la *région des solutions non saturées.*

Si, pour la même solution, on revient de B en M, on peut, en opérant avec des précautions spéciales, traverser la courbe de solubilité au moment de la saturation et la dépasser jusqu'en B' en abaissant la tem-

pérature, sans qu'il y ait dépôt de sel. La solution est alors *sursaturée*, mais si, étant arrivé en B′ on introduit un fragment du sel, la concentration tombe ***brusquement*** à la valeur du point M′, car la sursaturation est un faux équilibre analogue à la surfusion. La région de B′, à gauche de la courbe de solubilité, est une *région de solutions sursaturées*.

Solution non saturée. — A une température inférieure à la température de congélation du dissolvant pur, une *solution non saturée* prend en présence d'un excès du liquide dissolvant congelé, une concentration particulière qui est fonction de la température ; si on abaisse la température, la solution perd de nouveau du dissolvant qui se congèle et la concentration s'élève, la courbe des concentrations est ici ascendante ; cette courbe $c = \varphi(t)$ est une courbe d'équilibre pour le système des deux phases : *solution non saturée et dissolvant solide en excès*.

Point d'eutexie. — Les deux courbes de concentrations se coupent en un point E qui est le *point d'eutexie;* l'ordonnée de ce point est une *concentration d'eutexie* déterminée, commune aux deux courbes. En ce point, *il y a équilibre pour le système des trois phases :* dissolution, dissolvant solide, corps soluble précipité. En refroidissant un peu au-dessous du point d'eutexie, le tout se prend en masse. Si l'on mélange un corps soluble et le dissolvant solide, portés tous les deux préalablement à la température d'eutexie, il n'y a pas dissolution.

ÉQUILIBRE OSMOTIQUE

302. *A la pression osmotique*, mesurée avec une *membrane hémiperméable* (**141**), le phénomène de l'osmose est ***réversible*** et il suffit d'une très petite diminution ou augmentation de la pression pour que l'eau traverse la cloison hémiperméable dans un sens ou dans l'autre.

Avec des solutions très étendues, la pression osmotique est ***indépendante du dissolvant***. Le dissolvant se comporte comme un espace offert à l'expansion du corps dissous; les molécules dissoutes paraissent assez écartées, pour être sans action réciproque ; elles ressemblent à des molécules gazeuses qui occuperaient le même espace. Si, par exemple, on ajoute du dissolvant dans une solution très étendue, les particules dissoutes se détendent sans phénomène thermique, à la façon d'un gaz (**397**).

La pression osmotique suit les lois de la pression d'un gaz.

1° ***La pression osmotique est proportionnelle à la concentration***. — ***A température constante***, pour une même substance dissoute, la pression osmotique p est en raison inverse du *volume occupé* dans la solution par l'unité de masse dissoute. V étant le volume de la dissolution, m la masse dissoute, $v = \frac{V}{m}$ est le volume spécifique. On a la relation $pv = C^{te}$ (loi analogue à la loi de Mariotte).

2° ***La pression osmotique est proportionnelle à la température absolue***. — ***A concentration constante*** (c'est-à-dire quand le volume occupé par l'unité de masse dissoute est constant), pour une même substance

dissoute, la pression osmotique augmente de $\frac{1}{273}$ de sa valeur pour chaque degré d'élévation de température (loi analogue à la loi de Gay-Lussac).

Soit p_0 la pression osmotique à 0°, p_t à t°; on a :

$$p_t = p_0 \left(1 + \frac{t}{273}\right) = \frac{p_0}{273}(273 + t) = \frac{p_0}{273}\mathrm{T}; \qquad \mathrm{T} = 273 + t.$$

3° ***Loi générale de la pression osmotique des solutions étendues.*** — Si la concentration et la température varient à la fois, la combinaison des deux premières lois conduit à une équation analogue à celle des gaz parfaits (**223**).

$$pv = \frac{p_0 v_0}{273}(273 + t) = \frac{p_0 v_0}{273}\mathrm{T} = \mathrm{RT}.$$

Pour une même masse de substance dissoute et, en particulier, pour une masse dissoute égale à 1 gramme, R *varie avec la substance* (1).

Solutions équimoléculaires. — En prenant, dans un même espace du dissolvant, une masse dissoute égale à la masse moléculaire M de la substance dissoute, l'équation générale devient :

$$\mathrm{M}pv = \mathrm{M}\frac{p_0 v_0}{273}\mathrm{T} = \mathrm{R}_1 \mathrm{T}.$$

La pression osmotique p_0 est alors la même quand on dissout, en solution étendue, dans un même espace V de dissolvant, des masses des différentes substances égales à leurs masses moléculaires. Comme le volume moléculaire $\mathrm{M}v_0$ est constant, R_1 est constant. La valeur de R_1 est la même que dans l'équation des gaz parfaits (**223**).

Calcul de R_1. — Soit une solution à 1 % de sucre de canne dans l'eau (1 gr. de sucre occupe 100 cent. cubes). La masse moléculaire, M = 342 (2), occuperait un volume $\mathrm{M}v_0 = 34.200$ cent. cubes.

On a trouvé, à 0°, $p_0 = 671$ gr. par cm².

$$\mathrm{R}_1 = \mathrm{M}\frac{p_0 v_0}{273} = \frac{671 . 34200}{273} = 84500 \text{ (3)}.$$

Détermination des masses moléculaires. — La connaissance de R_1 permet de calculer la masse moléculaire d'une substance (en particulier, d'une substance organique non électrolysable), quand on connaît sa pression osmotique à T° (à zéro par exemple).

Soit p_0 la pression osmotique en grammes, de la substance, à 0°; si un poids m, en grammes, de la substance est dissous dans un volume V du dissolvant, $\frac{\mathrm{V}}{m}$ est le volume v_0 occupé par un gramme, M $\frac{\mathrm{V}}{m}$ est le volume moléculaire. L'équation : $84.500 = \mathrm{M}p_0 \frac{\mathrm{V}}{m} \cdot \frac{1}{273}$ permet de calculer M.

---

(1) Les solutions concentrées ne suivent pas ces lois osmotiques simples, de même que les gaz non parfaits ne suivent pas les lois de Mariotte et de Gay-Lussac.

(2) La formule du sucre de canne est $C^{12}H^{22}O^{11} = 342$ (C = 12, H = 1, O = 16);

(3) Pour les dissolutions étendues des *corps électrolysables*, la pression osmotique a une valeur supérieure à celle qui correspond à la masse moléculaire ; on a $\mathrm{M}pv = i\mathrm{R}_1\mathrm{T}$. le coefficient i, égal à 2, 3, 4..., varie avec l'électrolyte.

CALORIMÉTRIE

303. Sources de chaleur. — Certains corps élèvent la température des corps qui les environnent; ce sont des sources de chaleur; tels sont le soleil, un corps chaud qui se refroidit, un liquide qui se solidifie, une vapeur qui se condense, des combustibles qui brûlent, les êtres vivants, un conducteur traversé par un courant électrique.

Pour échauffer un corps, pour le fondre, le vaporiser, on le met en communication avec des sources de chaleur.

Quantité de chaleur. — Comme il faut constamment brûler une même quantité de charbon pour échauffer un même corps de 0^0 à t^0, ce corps exige toujours une même quantité de chaleur pour passer de 0^0 à t^0, L'échauffement simultané de 0^0 à t^0 de deux, trois corps identiques au premier, exige une dépense de charbon double ou triple ou une quantité de chaleur double ou triple. Une quantité de chaleur est donc une *grandeur mesurable* (1).

La notion de *quantité de chaleur* est *distincte* de la notion de *température*. Deux corps A et B, de même température, sont en équilibre calorifique, bien que leurs quantités de chaleur puissent être différentes. Entre deux corps de températures différentes, qui renferment des quantités de chaleur égales, il y a échange calorifique jusqu'à égalisation des températures.

De même, *en hydraulique*, entre deux vases communiquants réunis par un tube, l'équilibre a lieu si les niveaux sont les mêmes, quelles que soient les sections des deux vases et par conséquent les quantités de liquide qu'ils renferment respectivement. Lorsque les niveaux sont différents, il passe du liquide du niveau le plus élevé au niveau le plus bas et l'équilibre s'établit quand les niveaux sont devenus les mêmes. Les températures correspondent aux niveaux, les quantités de chaleur aux quantités de liquide.

304. Objet de la calorimétrie. — La calorimétrie est la mesure des quantités de chaleur absorbées par un corps dont on élève la température, ou par un corps qui subit un changement

---

(1) Pour une démonstration plus rigoureuse, prenons un corps A à t^0 et de la glace en excès à 0^0. En les mélangeant, une masse m de glace fond et le mélange reste à zéro, la masse de glace fondue peut mesurer la chaleur que perd A en passant de t^0 à 0^0. Si on double ou triple la masse du corps A à t^0, des masses $2m$, $3m$ de glace sont fondues. Ces masses correspondent à des quantités de chaleur double et triple.

d'état. La *thermochimie*, qui mesure les quantités de chaleur des réactions chimiques, est un chapitre de la calorimétrie.

Calorie. — On évalue les quantités de chaleur au moyen d'une unité appelée calorie. La *calorie est la quantité de chaleur qu'il faut donner à un gramme d'eau pour élever sa température de* 0^0 *à* 1^0 (du thermomètre normal à hydrogène et à échelle centigrade).

On appelle *Calorie* (1) la quantité de chaleur qui élève de 0^0 à 1^0 la température d'un *kilogramme* d'eau, elle *vaut 1000 calories*. Sauf avis contraire, nous emploierons la calorie du gramme.

305. PRINCIPES EXPÉRIMENTAUX. — 1° La répétition d'un *même phénomène* qui absorbe de la chaleur exige toujours la *même quantité de chaleur*.

2° Pour échauffer, *du même nombre de degrés*, des masses différentes d'une même substance, il faut *des quantités de chaleur proportionnelles aux masses*.

3° Si une quantité de chaleur est absorbée dans un phénomène, une quantité de chaleur *égale* est dégagée dans le *phénomène inverse;* ainsi. la chaleur absorbée par un corps qui s'échauffe de t à T est égale à celle qu'il dégage en se refroidissant de T à t.

4° Deux quantités de chaleur égales pour produire un effet. restent égales pour produire un autre effet.

5° Quand il y a un simple échange de chaleur entre différents corps, la quantité de chaleur se conserve; on n'observe que des variations de distribution, sans perte.

Ces propositions résultent de l'ensemble des expériences.

306. Définition pratique de la calorie. — Si l'on mélange 1 kilogramme d'eau à 0^0 et 1 kilogramme d'eau à 2^0, on obtient 2 kilogrammes à 1^0. Cela prouve qu'il faut la même quantité de chaleur pour porter une même masse d'eau de 0^0 à 1^0 et de 1^0 à 2^0.

Et encore, si l'on mélange 1 kilogramme d'eau à T^0 et 1 kilogramme d'eau à 0^0, la température du mélange est très voisine de $\frac{T}{2}$. Il faut donc, *très sensiblement*, une même quantité de chaleur pour échauffer une même masse d'eau de 0^0 à 1^0, de 1^0 à 2^0, ... de t^0 à $(t+1)^0$ jusqu'à T^0. Cela se vérifie jusqu'à 50^0 environ.

D'après cela, on peut, pratiquement, appeler *calorie la quantité de chaleur nécessaire pour élever de* t^0 *à* $(t+1)^0$ *la température d'un gramme d'eau*. Donc $t - t'$ calories élèveront de $t - t'$ degrés

(1) Avec une majuscule.

la température de 1 gramme d'eau et $m(t - t')$ calories élèveront de $t - t'$ degrés la température de m grammes.

CHALEURS SPÉCIFIQUES

307. Il faut des quantités de chaleur inégales pour porter à la même température des masses égales de différents corps.

Le nombre de calories qu'il faut fournir à un gramme d'un corps pour élever sa température de t^0 à $(t+1)^0$ est sa **chaleur spécifique** à t^0. D'après la définition pratique de la calorie, la chaleur spécifique de l'eau à t^0 est 1 (jusqu'à 50° environ).

En désignant par Q le nombre de calories nécessaires pour échauffer de 0° à t^0 un gramme d'un corps, le quotient $\frac{Q}{t}$ est à peu près constant entre 0° et 100°; c'est le nombre de calories absorbées par l'unité de masse d'un corps pour une élévation de température de 1°, ou la *chaleur spécifique moyenne* du corps de 0° à 100°.

Soit m la masse d'un corps homogène, et c la *chaleur spécifique moyenne* de sa substance, le produit mc s'appelle la *capacité calorifique* du corps [1]. Lorsque sa température croît de t^0, le nombre de calories absorbées par la masse m est mct.

On détermine les chaleurs spécifiques par plusieurs méthodes.

308. Méthode des mélanges. — *Principe de la méthode.* — On mélange, par exemple, 3000 grammes de mercure à 100° et 1000 grammes d'eau à 0°; il s'établit bientôt un équilibre de température et la température finale du mélange atteint 9°.

La chaleur cédée par le mercure a été gagnée par l'eau. Le mercure s'est abaissé de 91°; x désignant la chaleur spécifique moyenne du mercure, 3000 grammes de mercure ont perdu :

$$3000.91.x \text{ calories}:$$

d'autre part, les 1000 grammes d'eau ont gagné : 1000.9.

De l'égalité : $3000.91.x = 1000.9$, on tire $x = 0,033$.

Appareil de Regnault (fig. 318). — Une masse M de la substance, en petits fragments, est placée dans la concavité annulaire d'une corbeille G en toile de laiton (fig. 319). Cette corbeille est suspendue, par trois fils de soie que termine un cordon, dans une étuve à double enveloppe F, maintenue à une température constante par un courant

(1) Ou *sa valeur en eau;* c'est en effet la masse d'eau qui absorberait le même nombre de calories pour s'échauffer de 1°.

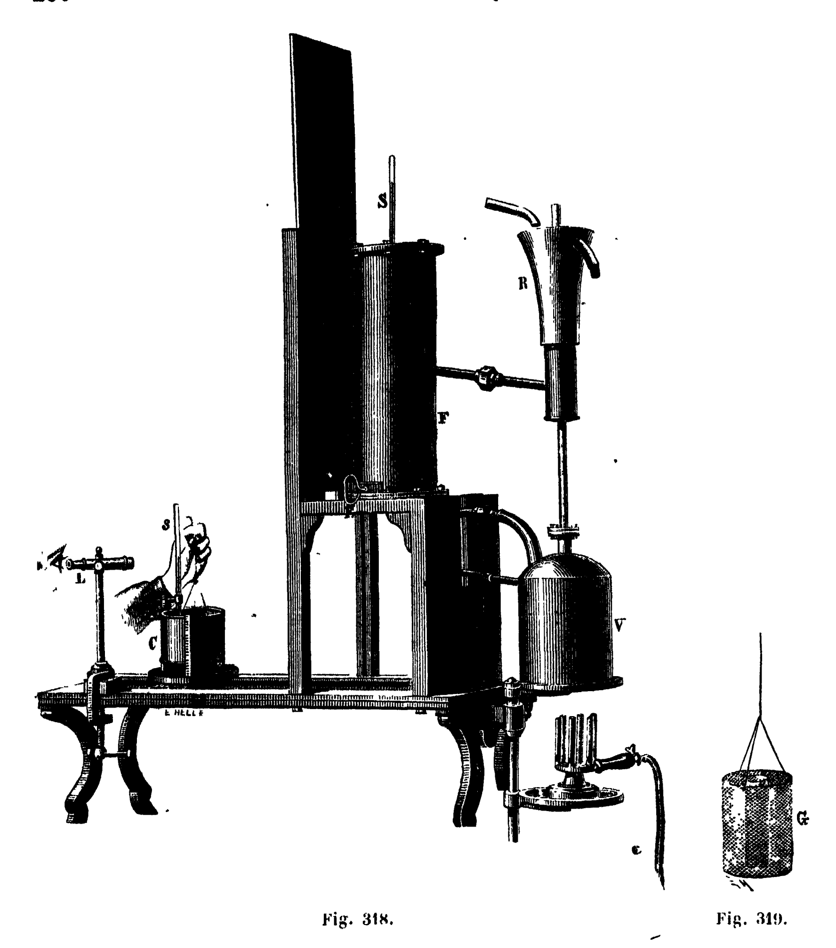


Fig. 318. Fig. 319.

de vapeur (fig. 320). Quand le thermomètre S logé dans l'axe de la corbeille est stationnaire à T°, on fait rapidement glisser sous l'étuve un récipient cylindrique en laiton mince *c* appelé *calorimètre;* le calorimètre contient de l'eau à une température *t*, marquée par un thermomètre sensible *s* de petite dimension; on y laisse tomber doucement la corbeille et le corps (1).

On éloigne ensuite le calorimètre de l'étuve et tout en agitant la corbeille et le corps dans le liquide, on observe, avec une lunette L,

(1) L'étuve est formée de trois cylindres concentriques; la corbeille G et le thermomètre sont logés dans le cylindre central. Un tiroir E permet de laisser descendre dans le calorimètre, au moment voulu, la corbeille et son contenu. La vapeur qui circule dans l'étuve est produite par une chaudière V; un réfrigérant R condense la vapeur à sa sortie et la fait retomber dans la chaudière (fig. 318).

le thermomètre s qui passe rapidement de t à un maximum θ.

Calcul. — Le corps et la corbeille ont perdu $T - \theta$ degrés. Appelons M la masse du corps, x sa chaleur spécifique, m_1 la masse de la corbeille, c la chaleur spécifique du laiton; le corps et la corbeille ont cédé :

$(Mx + m_1 c)(T - \theta)$ calories.

Appelons E la masse de l'eau du calorimètre, m, m', m'' les masses du calorimètre, du verre et du mercure du thermomètre; c, c', c'' les chaleurs spécifiques du laiton, du verre et du mercure. La capacité calorifique de l'ensemble du calorimètre, de l'eau et du thermomètre est :

$M' = E + mc + m'c' + m''c''$ (1).

Le calorimètre et son contenu se sont élevés de $\theta - t$ degrés et ont gagné $M'(\theta - t)$ calories.

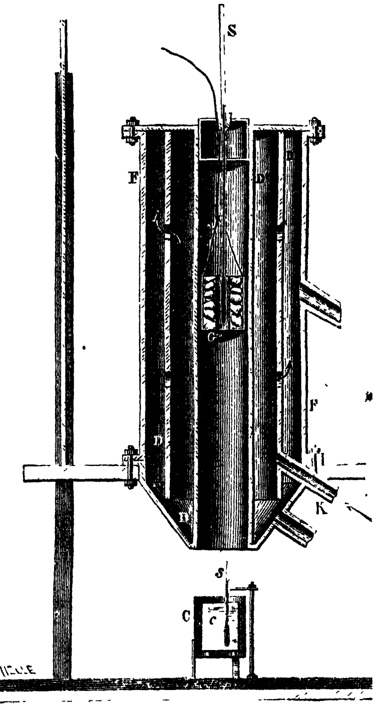


Fig. 320.

Pendant l'échange de chaleur. le calorimètre perdait R calories par la conductibilité de ses supports, le rayonnement, l'évaporation et le contact de l'air.

La chaleur abandonnée par ce qui s'est refroidi est égale à la chaleur gagnée par ce qui s'est échauffé, accrue de la chaleur R perdue par refroidissement. C'est ce qu'exprime l'équation :

$$(Mx + m_1 c)(T - \theta) = M'(\theta - t) + R.$$

S'il s'agit d'un liquide, le liquide, enfermé dans une fiole de verre mince, est chauffé à T°, puis plongé dans le calorimètre.

Correction de refroidissement (2). — On rend négligeable la perte par *conductibilité* en supportant le calorimètre par trois *pointes de liège;* on réduit la perte par *rayonnement* en *polissant la surface*

(1) Sans calculer séparément mc, $m'c'$, $m''c''$, on peut déterminer leur somme par une deuxième expérience effectuée avec des masses M et E différentes; on a une deuxième équation qui donne en bloc $mc + m'c' + m''c''$.

(2) La masse d'eau du calorimètre est assez grande pour que la température finale diffère peu de la température ambiante, aussi le refroidissement est-il faible.

extérieure du calorimètre pour diminuer son pouvoir émissif et en l'entourant d'un autre vase en laiton C, *poli intérieurement*, qui renvoie sur le calorimètre la chaleur rayonnante qu'il en reçoit. L'immobilité de l'air compris entre les deux vases de laiton réduit la déperdition par *le contact de l'air* (fig. 320).

Malgré ces précautions, le calorimètre se refroidit, car le thermomètre, après avoir atteint son maximum θ, baisse lentement [1].

Calorimètre de Berthelot (fig. 321). — Afin de réduire au minimum les échanges de chaleur du calorimètre avec l'extérieur, Berthelot a enfermé l'ensemble des deux vases du calorimètre dans une enceinte à double paroi. Cette enceinte est recouverte extérieurement de feutre épais et renferme une masse de 10 litres d'eau environ, dont la température est maintenue sensiblement uniforme pendant une expérience par un agitateur *a*. Un couvercle, percé d'une ouverture pour laisser passer le thermomètre *e*, et recouvert de feutre, protège la partie supérieure du calorimètre. Le calorimètre se trouvant à l'abri du rayonnement de l'observateur, on peut lire le thermomètre sans lunette. La perte par refroidissement est souvent négligeable; en tout cas, elle est très faible et très régulière.

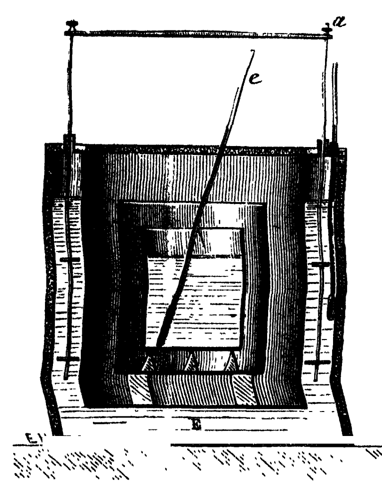


Fig. 321.

309. Méthode de la fusion de la glace (fig. 322). — Si l'on met un corps de masse M, de température T et de chaleur spécifique

---

(1) ***Évaluation de la correction.*** — Un aide a noté la température du calorimètre de 10 en 10 secondes. Pour chacun de ces intervalles de temps, les excès moyens du calorimètre sur le milieu ambiant sont $\tau_1, \tau_2, \ldots \tau_n$. D'après la loi du refroidissement de Newton (**332**), les abaissements de température du calorimètre sont, pour de petits intervalles de temps égaux, proportionnels à ses excès de température. La somme des abaissements de température successifs du calorimètre sera :

$$A\tau_1 + A\tau_2 \ldots = A\Sigma\tau = \delta.$$

On détermine A par une expérience auxiliaire; à cet effet, on observe l'abaissement de température δ' pour une durée de 2 minutes et un excès moyen τ' sur le milieu ambiant. L'équation $\delta' = 12\,A\tau'$ donne A (2 minutes valent 12 fois 10 secondes).

La perte de chaleur par refroidissement est : $R = (M' + Mx + m_1c)\,\delta$.

D'où l'équation corrigée :

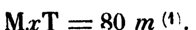
$$(Mx + m_1c)(T - \theta) = M'(\theta - t) + (M' + Mx + m_1c)\,\delta$$

$\theta' = \theta + \delta$ étant la température d'équilibre accrue de l'abaissement de température par refroidissement, l'équation définitive est : $(Mx = m_1c)(T - \theta') = M'(\theta' - t)$.

x, en contact avec de la glace à 0^0, le corps descend à 0^0 en perdant MxT calories qui fondent m grammes de glace.

Un gramme de glace à 0^0 exigeant 80 calories pour passer à l'état d'eau à 0^0, la glace fondue a absorbé 80 m calories.

La chaleur perdue par le corps étant gagnée par la glace fondue, x se déduit de l'équation :



$$MxT = 80\,m\ ^{(1)}.$$

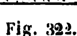


Fig. 322.

On a creusé une cavité dans un bloc de glace B à 0^0 et on y applique une lame de glace C formant couvercle. Dans la cavité préalablement essuyée, on introduit le corps de masse M.

L'eau de fusion est recueillie avec du papier buvard dont l'augmentation de poids donne m.

Il est difficile d'effectuer avec précision la pesée de la glace fondue ; en outre, la température intérieure du bloc de glace peut être inférieure à zéro, si le bloc n'a pas été entouré pendant longtemps de glace fondante.

Calorimètre de Bunsen (fig. 323). — La méthode de la fusion de la glace devient *très précise* par l'emploi du calorimètre de Bunsen. Au lieu de *peser* la glace fondue, on observe la *diminution de volume* que la glace à 0^0 éprouve, en passant à l'état liquide, sans changement de température.

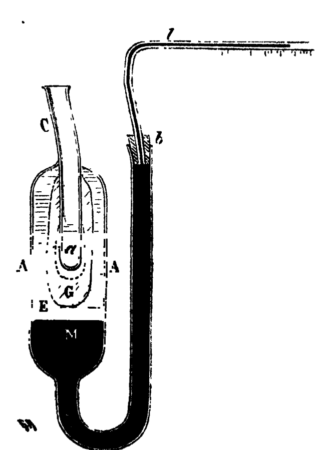


Fig. 323.

Description de l'appareil. — L'une des branches d'un tube en U présente un renflement cylindrique A, à la partie supérieure duquel est soudé un tube de verre mince C. En haut de l'autre branche, est fixé, par un bouchon b, un tube fin t recourbé horizontalement et divisé en parties d'égale capacité. Le tube horizontal, la branche étroite du tube en U et la partie inférieure du renflement contiennent du mercure, le reste du renflement est plein d'eau distillée purgée d'air.

On détermine la solidification de l'eau, au moins en partie, en versant dans le tube central C, du chlorure de méthyle que l'on fait évaporer rapidement. En se congelant en G autour du tube central, l'eau augmente de volume et refoule le mercure.

L'appareil est placé dans une caisse métallique et entouré de glace

(1) La méthode de la fusion de la glace peut servir à démontrer que la chaleur se conserve dans les échanges. Un corps A à t^0 fond m de glace pour passer à 0^0, un corps B à t'^0 fond m'. Si on recommence en mettant préalablement A et B en contact, ils ont pris une même température θ ; alors A fond m_1, B fond m'_1, et on a $m_1 + m'_1 = m + m'$.

fondante, pour le soustraire aux causes extérieures de réchauffement.

Expérience. — On introduit dans le tube central C, qui contient un peu d'eau à 0°, une masse M d'un corps de chaleur spécifique x, chauffée à T°; ce corps en passant à 0°, fond autour du tube C une certaine quantité de glace; la contraction du mélange G d'eau et de glace fait rétrograder le mercure de N divisions dans le tube divisé t.

Soit k le nombre de divisions parcourues par le mercure du tube divisé pour une calorie reçue par le mélange d'eau et de glace, $\frac{N}{k}$ sera le nombre de calories dégagées dans l'expérience précédente. La chaleur spécifique x est donnée par l'équation : $MxT = \frac{N}{k}$.

La constante k se détermine en versant dans le tube central une masse m d'eau à θ°, cette eau abandonne $m\theta$ calories en passant à 0° et produit ainsi un déplacement n; le déplacement dû à une calorie est $\frac{n}{m\theta} = k$.

Les mesures peuvent se succéder, avec cet appareil, jusqu'à fusion entière du bourrelet de glace G qui entoure le tube central.

Dans le cas d'un liquide, on verse le liquide de masse M et de température T dans le tube C. D'après la course N du mercure dans le tube divisé, on a : $MxT = \frac{N}{k}$.

310. Chaleur spécifique des gaz. — La chaleur spécifique d'un gaz, à pression constante, est le nombre de calories qu'il faut donner à 1 gramme de ce gaz pour l'échauffer de 1°, sa pression restant constante. On peut l'obtenir par la méthode des mélanges.

Comme les gaz ont une faible masse par unité de volume, on doit en prendre un grand volume pour opérer sur une masse suffisante.

Le gaz étant contenu dans un gazomètre, on le fait écouler *régulièrement,* sous une pression constante et *faible,* dans un serpentin de cuivre long et étroit, placé dans une étuve. Le gaz s'échauffe à une température connue T. Il passe ensuite dans un calorimètre en laiton, plongé dans l'eau, y perd sa chaleur et s'échappe dans l'atmosphère.

Appelons M la masse du gaz qui a traversé le calorimètre et x sa chaleur spécifique, M′ la capacité calorifique du système calorimétrique et $\theta_1 - \theta_2$ son élévation de température; la chaleur cédée par le gaz est la même que s'il passait, en entier, de la température T à la température moyenne du calorimètre $\frac{\theta_1 + \theta_2}{2}$, en raison de la régularité de son écoulement et on écrit :

$$Mx\left(T - \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}\right) = M'(\theta_1 - \theta_2) + R.$$

311. Résultats. — La chaleur spécifique d'un corps *croît avec la température* (1). La quantité de chaleur nécessaire pour échauffer

(1) Si la chaleur spécifique d'une substance était indépendante de la température, une température serait *proportionnelle à une quantité de chaleur.* Les températures

un gramme d'une substance de 0^0 à t^0 est : $Q = at + bt^2 + ct^3$; a, b, c sont trois constantes particulières à chaque corps, qu'on détermine par trois expériences (de 0^0 à t^0, de 0^0 à t'^0, de 0^0 à t''^0).

La chaleur spécifique d'une substance à l'état liquide est plus grande que sa chaleur spécifique à l'état solide ou à l'état gazeux.

Si l'on excepte l'hydrogène, *l'eau est la substance qui a la plus grande chaleur spécifique.*

A chacun des états moléculaires d'une même substance chimique correspond une chaleur spécifique différente. Tel est le cas du carbone, du soufre, du phosphore, etc.

TABLE DE CHALEURS SPÉCIFIQUES

Argent	0,057	Diamant	0,147
Cuivre	0,095	Verre	0,198
Zinc	0,096	Eau	1
Fer	0,113	Glace	0,5
Platine	0,032	Essence de térébenthine	0,426
Mercure	0,033	Alcool	0,615

CHALEURS SPÉCIFIQUES DES GAZ SOUS PRESSION CONSTANTE

Air	0,237	Hydrogène	3,409
Oxygène	0,218	Anhydride carbonique	0,215
Azote	0,244	Chlore	0,112

Les gaz simples, à égalité de volume, de température et de pression, ont la même chaleur spécifique à pression constante.

Loi de Dulong et Petit. — *Le produit de la chaleur spécifique* c *d'un corps simple solide par son poids atomique* a *est constant* (1) (voisin de 6,4).

	c	a	ca
Arsenic	0,083	75	6,2
Iode	0,054	127	6,8
Soufre	0,203	32	6,5
Zinc	0,0955	65	6,2
Argent	0,057	108	6,2

En admettant que le poids atomique d'un corps simple est la masse de l'atome de ce corps, on peut dire que la *capacité calorifique des atomes* des corps simples à l'état solide est la même pour tous.

Loi de Wœstyn. — Les atomes des corps simples *conservent, dans*

s'ajouteraient comme les quantités de chaleur et la température serait une grandeur mesurable susceptible d'addition et de soustraction.

(1) Le produit ca ne peut pas être rigoureusement constant, car un poids atomique est invariable et une chaleur spécifique varie avec la température. La chaleur spécifique représente d'ailleurs la chaleur employée non seulement à élever la température, mais aussi à effectuer un travail de dilatation et des changements d'état moléculaire.

une combinaison, la capacité calorifique qu'ils ont *à l'état de liberté, et la capacité calorifique d'un composé solide est égale à la somme des capacités calorifiques des composants* à l'état solide.

D'après cet énoncé, étant donné un corps de masse moléculaire A et de chaleur spécifique C, contenant n atomes de masse a et de chaleur spécifique c, n' atomes de masse a' et de chaleur spécifique c'...

$$\text{on a} \quad CA = nca + n'c'a' + \ldots$$

Si, par exemple, on suppose connues la chaleur spécifique d'un sulfure et celle du métal, la relation précédente donne la chaleur spécifique du soufre solide; elle est conforme à la valeur obtenue directement (1).

CHALEURS DE FUSION

312. *La chaleur de fusion d'une substance est le nombre de calories* L *absorbées par 1 gramme de cette substance, en passant de l'état solide à l'état liquide, à la température de fusion, sans changement de température.*

En repassant de l'état liquide à l'état solide, 1 gramme de la même substance abandonne le même nombre de calories L; la chaleur de solidification est égale à la chaleur de fusion.

Les chaleurs de fusion se déterminent ordinairement par la méthode des mélanges.

Corps solide à la température ordinaire. — On prend m grammes du solide. Le corps, fondu et porté à une température T supérieure au point de fusion τ, est plongé dans un calorimètre renfermant de l'eau à t^0.

Au contact de l'eau, il perd de la chaleur en trois étapes : 1° de T à τ, le liquide perd $mc\,(T - \tau)$ calories, c chaleur spécifique du liquide de T à τ; 2° en se solidifiant à τ^0, il abandonne mL calories; 3° devenu solide, il se refroidit de τ à θ, θ étant la température finale du calorimètre et il dégage ainsi $mc'\,(\tau - \theta)$ calories, c' chaleur spécifique du solide de τ à θ.

La chaleur totale cédée par le corps étant égale à la chaleur gagnée par le calorimètre de capacité calorifique M', nous avons l'équation :

$$mc\,(T - \tau) + mL + mc'\,(\tau - \theta) = M'\,(\theta - t);$$

θ est la température finale corrigée de l'effet du refroidissement pendant l'expérience. Cette équation donne L (2).

Corps liquide à la température ordinaire. — On prend m grammes du liquide; on le congèle et on le porte à une température T inférieure

(1) En admettant en même temps la loi de Dulong et Petit, d'après laquelle $ca = c'a'$... on écrira $CA = (n + n' + n''...)\,ca = (n + n' + ...)\,6,4$. Or, pour des composés solides de même constitution, $n + n' + ...$ est constant; on a donc la loi suivante : *le produit du poids moléculaire des corps composés solides, de constitution chimique semblable, par leur chaleur spécifique, est un nombre constant* (variable avec chaque classe de corps).

(2) Si l'on ne connaît pas c et c', on fera deux autres expériences avec des masses m_1 et m_2 du corps et on aura ainsi trois équations pour calculer L, c et c'.

à la température τ de fusion ; on le plonge ensuite dans un calorimètre dont la température est t.

1° Le corps solide passe de T à τ et absorbe $mc'(\tau - T)$ calories ; 2° il fond à τ^0 et absorbe mL ; 3° il s'échauffe de τ à θ et absorbe $mc(\theta - \tau)$. Le calorimètre a perdu $M'(t - \theta)$. Égalons les chaleurs absorbées et cédées :

$$mc'(\tau - T) + mL + mc(\theta - \tau) = M'(t - \theta).$$

Chaleur de fusion de la glace. — De la neige à $-T^0$, est introduite dans un calorimètre à t^0. La température finale est θ. L'équation :

$$mc'T + mL + m\theta = M'(t - \theta)$$

donne L. On se passe de connaître c', chaleur spécifique de la glace, en plongeant dans le calorimètre une masse m de glace *fondante* à 0°. On a :

$$mL + m\theta = M'(t - \theta).$$

Méthode du calorimètre de Bunsen. — La calorimètre ayant été préparé comme pour la détermination d'une chaleur spécifique, une masse d'eau m à t^0 est versée dans le tube central, elle perd mt calories en passant à 0° et fait fondre une masse μ de glace. La chaleur absorbée par la fusion de un gramme de glace est $\frac{mt}{\mu}$. Il reste à déterminer μ. Le mercure a retrogradé de N divisions sur le tube ; v étant le volume d'une division, d'après un jaugeage préalable, la diminution de volume est Nv. La contraction correspondant à la fusion de l'unité de masse de glace est égale à 0,091 (1) ; donc $\frac{Nv}{0,091} = \mu$. On trouve $\frac{mt}{\mu} = 80$.

CHALEURS DE FUSION

Glace	80	Phosphore	5,03
Soufre	9,4	Zinc	28,1
Étain	14,2	Plomb	5,4

La chaleur de fusion de la glace étant 80, un mélange de 1 kg. de glace à 0° et 1 kg. d'eau à 80° donne 2 kg. d'eau à 0°.

La valeur considérable de la chaleur de fusion de la glace justifie l'emploi de la glace pour maintenir les liquides frais en été ; en préservant les glaciers d'une fonte trop rapide, elle régularise l'alimentation des fleuves qui prennent leurs sources dans les massifs montagneux, évite des inondations désastreuses au printemps, et maintient un débit suffisant pendant l'été.

---

(1) Désignons par g_0 la densité de la glace à 0° ($g_0 = 0^{gr},91674$), par e_0 la densité de l'eau à 0° ($e_0 = 0^{gr},99988$).

$\frac{1}{g_0}$ et $\frac{1}{e_0}$ sont les volumes de l'unité de masse pour la glace et pour l'eau à 0°

$$\frac{1}{g_0} - \frac{1}{e_0} = 0,091$$

est la contraction de l'unité de masse de glace à 0°, passant à l'état d'eau à 0°.

CHALEURS DE VAPORISATION

313. On appelle **chaleur de vaporisation** d'une substance, à t^0, le *nombre L de calories qu'exige un gramme de cette substance à t^0 pour passer à l'état de vapeur saturante* à la même température; la transformation inverse dégage la même chaleur.

On détermine la chaleur de vaporisation d'un liquide à t^0 par la méthode des mélanges. On le fait bouillir à cette température sous la pression correspondante, et on dirige la vapeur dans un serpentin entouré d'eau froide. La chaleur cédée par un gramme de vapeur, en se condensant, est la chaleur de vaporisation.

Appareil de Berthelot (fig. 324). — L'appareil, tout en verre, consiste en une fiole fermée à la partie supérieure et traversée suivant son axe par un large tube vertical ouvert, *ab*, qui lui est soudé. Ce tube s'ajuste, en *b*, par une extremité rodée à l'émeri, dans un serpentin CS qui aboutit à un réservoir R surmonté d'un tube K ouvert à l'extérieur. Le serpentin est plongé dans un calorimètre contenant de l'eau, poli extérieurement et reposant, par des pointes de liège, sur le fond d'un second vase dont la surface intérieure est également polie.

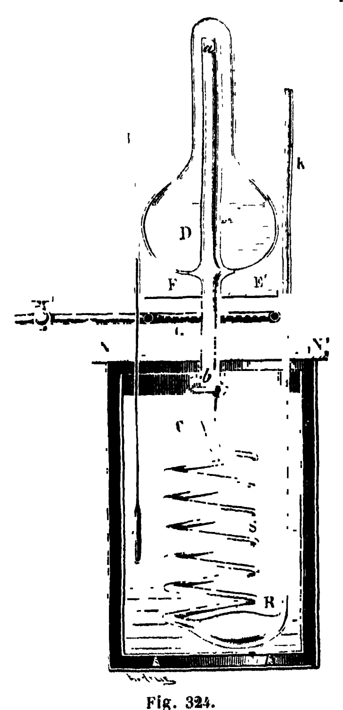


Fig. 324.

Le second vase, fermé en haut par une plaque en bois NN', percée de trous pour laisser passer le tube *ab* et un thermomètre T, est entouré par un récipient à double paroi, qui n'est pas représenté ici.

La fiole est chauffée par une rampe à gaz G, dont elle est séparée par une toile métallique EE'.

La fiole est pesée : 1° vide: 2° avec le liquide D. On l'ajuste sur le serpentin par son tube *ab* et on chauffe. Une partie du liquide prend la température d'ébullition qui correspond à la pression extérieure, sa vapeur s'engage *sèche* (1) dans le tube *ab*, gagne le serpentin et s'y condense.

On pèse de nouveau la fiole avec le liquide restant. La diminution de la masse du liquide D est la masse *m* du liquide vaporisé.

(1) S'il y avait entraînement, dans le serpentin, de particules qui se trouveraient déjà condensées dans le col de la cornue, elles feraient partie de la masse recueillie *m* sans avoir cédé au serpentin leur chaleur de vaporisation.

Calcul. — La masse m de vapeur a perdu mL, en se liquéfiant, sans changement de température ; en passant de la température T d'ébullition à la température finale θ du calorimètre, elle a abandonné mc (T — θ) ; c chaleur spécifique moyenne du liquide entre T et θ.

Le calorimètre a gagné M' (θ — t) calories. M' capacité calorifique de l'appareil calorimétrique (calorimètre, eau, serpentin, agitateur, thermomètre), t température initiale de l'eau.

La chaleur perdue par la vapeur et par le liquide condensé est égale à la chaleur gagnée par le calorimètre. L'équation obtenue donne L :

$$mL + mc\,(T - \theta) = M'\,(\theta - t)$$

On opère à diverses températures en faisant *varier la pression intérieure* par le tube K qui surmonte le réservoir R (**303**).

Résultats. — La chaleur de vaporisation d'un liquide qu'on transforme, à t^0, en vapeur saturante, sous sa pression maximum f_t, diminue quand t s'élève. Au *point critique*, elle est nulle [1].

Pour l'eau (entre 0^0 et 200^0 environ) la chaleur de vaporisation est $L = 606{,}5 - 0{,}695\,t$. A 0^0, $L = 606{,}5$; à 100^0, $L = 537$.

CHALEURS DE VAPORISATION AU POINT D'ÉBULLITION SOUS LA PRESSION 76

Eau	537
Alcool	208
Éther	91

314. Chaleur absorbée et dégagée dans une distillation. — Une distillation présente : 1° une absorption de chaleur par vaporisation, chaque gramme de liquide exigeant, pour passer à l'état de vapeur saturante à T°, une quantité de chaleur égale à sa *chaleur de vaporisation à* T ; 2° un dégagement de chaleur par liquéfaction de la vapeur. La vapeur se comporte comme si elle transportait de la chaleur du foyer au réfrigérant. Le chauffage des habitations, par circulation de vapeur, est comparable à une distillation de l'eau.

Froid produit par l'évaporation. — Une absorption de chaleur par la vaporisation a lieu à toute température. Si l'on verse sur la main quelques gouttes d'un liquide très volatil, tel que l'éther, le liquide s'évapore rapidement et détermine un froid très appréciable. L'évaporation rapide d'un liquide très volatil à la surface de la peau peut produire l'insensibilisation par refroidissement. Dans les mêmes conditions, un liquide non volatil, tel que l'huile, ne produit pas d'impression de froid.

Le froid vif qu'on ressent en sortant de l'eau, surtout dans un

(1) Cela explique le passage rapide, à cette température, de l'état liquide à l'état gazeux.

courant d'air, tient à l'évaporation de la mince couche d'eau dont le corps est couvert. L'absorption de chaleur due à une transpiration abondante maintient le corps au-dessous de 40° dans des enceintes chauffées à 50° et 60°. L'eau qui traverse les pores des *alcarazas* s'évapore en absorbant de la chaleur, empruntée au liquide intérieur qui se refroidit.

Congélation de l'eau dans le vide. — On verse quelques gouttes d'eau sur une capsule de liège *a* au-dessus d'un cristallisoir C contenant de l'acide sulfurique. Le tout est disposé sous la cloche d'une machine pneumatique (fig. 325). Si l'on fait le vide, la vaporisation de l'eau s'accélère, l'acide sulfurique absorbe d'ailleurs la vapeur dégagée, et par là, active encore la vaporisation. Comme le liège est mauvais conducteur, la chaleur de vaporisation, proportionnelle à la masse de vapeur formée, est empruntée à l'eau elle-même qui se congèle en une lentille de glace.

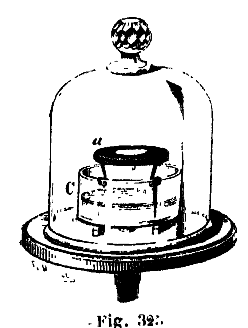


Fig. 325.

315. Applications. — La chaleur cédée par une vapeur qui se liquéfie est fréquemment utilisée pour échauffer des liquides par la méthode des mélanges, sans recourir directement à un foyer. On fait arriver une vapeur dans la masse liquide par un tuyau percé de trous. On utilise aussi, dans diverses circonstances, le refroidissement dû à la vaporisation d'un liquide.

Fabrication de la glace par la vaporisation de l'eau. — En aspirant, avec une pompe, la vapeur de l'eau contenue dans une carafe, et en absorbant, par un bain d'acide sulfurique, cette vapeur à mesure qu'elle se forme, on produit une évaporation rapide de l'eau. Le liquide emprunte à lui-même la chaleur nécessaire à sa vaporisation et *se congèle* (fig. 326).

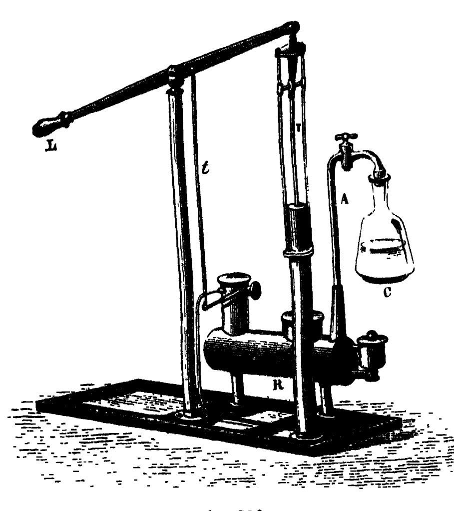


Fig. 326.

Le corps de pompe P d'une machine pneumatique est relié à la carafe C par un tuyau A. Sur le trajet du tuyau se trouve un réservoir R contenant l'acide sulfurique qui absorbe la vapeur émise par l'eau.

Un levier L met, à la fois en mouvement, la tige T du piston qui fait le vide et la tige *t* d'un agitateur qui mélange les couches d'acide sulfurique pour faciliter l'absorption de la vapeur d'eau.

Fabrication de la glace par la vaporisation de l'ammoniaque liquide. — Un récipient A contenant une solution saturée d'ammoniaque communique par un tube avec un vase creux C qui forme avec lui une enceinte fermée (fig. 327). On chauffe le récipient A sur un foyer F, l'ammoniaque se dégage et va se liquéfier en C. En plongeant ensuite le récipient A dans l'eau froide, l'ammoniaque liquéfiée en C se vaporise, cette fois sans l'intervention d'un foyer; elle produit ainsi un froid considérable dans le congélateur C auquel la chaleur de vaporisation est empruntée. Un cylindre E plein d'eau étant introduit dans la cavité du vase C, cette eau se congèle.

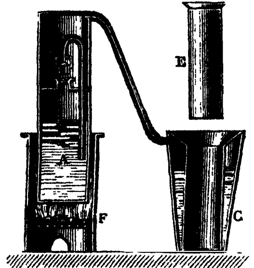


Fig. 327.

La vaporisation rapide de gaz liquéfiés produit des froids très considérables (**313**).

PROPAGATION DE LA CHALEUR

316. Modes d'échanges calorifiques. — Lorsque deux corps, de températures inégales, sont dans une même enceinte, l'équilibre de température tend à s'établir par un passage de chaleur du corps chaud au corps froid. La propagation se fait :

1° Par **convection** : il y a alors transmission *par contact*. Un corps chaud, en contact avec un corps *fluide*, échauffe directement les couches qui le touchent; celles-ci se *transportent* avec la chaleur qu'elles ont reçue et sont remplacées par d'autres qui s'échauffent à leur tour.

2° Par **conductibilité** : dans la conductibilité, la chaleur chemine *par contact* des particules chaudes aux particules froides d'un

corps, et élève leur température, sans transport de matière et *sans que les positions relatives des molécules soient changées.*

3° Par **rayonnement** : dans le rayonnement, la chaleur se transmet *à distance,* par l'éther, avec une très grande vitesse, sans transport de matière, sans échauffer les corps qu'elle traverse, jusqu à ce qu'elle rencontre un corps qui l'absorbe et dont elle élève alors la température.

CONDUCTIBILITÉ

317. Bons conducteurs. Mauvais conducteurs. — Une barre de *fer,* rougie au feu par un de ses bouts, est encore très chaude à une grande distance de cette extrémité, surtout si elle est grosse. Au contraire, une tige de *bois* peut être tenue par une de ses extrémités, tandis que l'autre est incandescente et la chaleur ne gagne pas la main, même lorsque la tige est courte (allumettes).

Une cuiller d'*argent,* à demi-plongée dans un liquide chaud, s'échauffe rapidement sur toute sa longueur; une cuiller de *bois* est à *peine chaude dans sa partie extérieure au liquide.* Les anses en bois des théières métalliques peuvent être tenues à la main, de même les manches d'outils qui vont au feu.

Les métaux sont dits *bons conducteurs* de la chaleur; le bois, le liège, le verre, la brique, sont de *mauvais conducteurs.*

C'est à leur conductibilité que les métaux et le marbre doivent de paraître froids au toucher, car la chaleur de la main est enlevée rapidement et se répand dans la masse du métal sans l'échauffer d'une manière appréciable. Sur une paroi de bois, la chaleur cédée par la main n'échauffe que le point de contact; aussi un parquet en planches paraît moins froid au toucher qu'un dallage en marbre.

318. Coefficient de conductibilité. — On caractérise un corps, au point de vue de la facilité avec laquelle il conduit la chaleur, par son coefficient de conductibilité intérieure.

État permanent dans une plaque homogène. — Pour préciser la signification de ce coefficient, considérons une plaque homogène, limitée par deux faces parallèles AA_1, BB_1, maintenues à des températures différentes V et V'. Supposons que des précautions sont prises pour que la plaque n'éprouve pas de déperdition par les faces latérales AB et A_1B_1; il passe de la chaleur de la face la plus

chaude AA_1 à la face la plus froide BB_1 en traversant les plans intermédiaires. Une tranche quelconque MM_1, parallèle aux faces extrêmes, aura constamment une même température en tous ses points. Après un temps qui varie avec la substance, un *état permanent* s'établit. Dans cet état, les différentes tranches MM_1, NN_1, parallèles aux faces terminales, présentent des températures fixes.

Courbe des températures fixes. — Ayant mené une droite a_1b_1 normale aux faces, si l'on porte perpendiculairement à cette droite, des longueurs a_1a, m_1m, n_1n, b_1b, égales aux températures des tranches A, M, N, B, on constate que leurs extrémités a, m, n, b sont en ligne droite. Cette droite ab (fig. 328) s'obtient en joignant les extrémités a et b de $a_1a = V$, et $b_1b = V'$; la température dans un plan MM_1 est l'ordonnée m_1m.

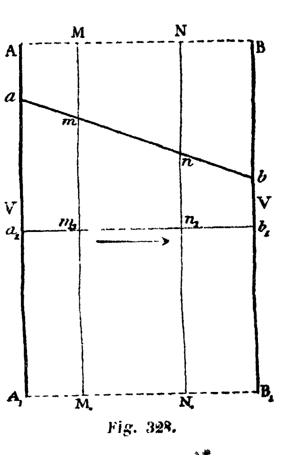


Fig. 328.

Expression du courant de chaleur. — Le flux de chaleur Q qui passe, en un temps θ, à travers une surface S d'une tranche parallèle aux faces AA_1 et BB_1, est la même pour toutes les tranches (1); elle augmente avec la différence des températures aux faces extrêmes, avec la minceur de la plaque et avec sa nature, ainsi elle est plus grande pour un métal que pour du marbre.

On démontre que le *flux* de chaleur Q de la plaque est proportionnel à la différence de température $V - V'$ des faces extrêmes et en raison inverse de l'épaisseur l; K est une constance qui dépend de la substance de la plaque.

$$Q = KS \frac{V - V'}{l} \theta.$$

Définition du coefficient de conductibilité. — D'après l'expression du flux de chaleur, le coefficient K de conductibilité intérieure d'une substance est la quantité de chaleur qui, *à l'état permanent*, traverse en une seconde un centimètre carré d'un plan parallèle aux faces extrêmes d'une plaque ayant un centimètre d'épaisseur, et dont les températures extrêmes diffèrent de 1°.

Mesure du coefficient de conductibilité. — La quantité de chaleur qui traverse chacune des tranches est empruntée au milieu qui

(1) La température des tranches intermédiaires ne variant plus quand l'état est devenu permanent, il ne reste en route rien du flux transmis.

baigne la face AA_1 ; par la face BB_1, elle est transmise à un second milieu. Si la chaleur qui traverse une plaque de surface S et d'épaisseur l, sert à fondre de la glace au contact de la face BB_1, la mesure de la masse P de glace fondue, en un temps θ, conduit au coefficient K par l'équation $P.\ 80 = KS \frac{V}{l} \theta$.

V et 0⁰ températures respectives des faces AA_1 et BB_1. Voici quelques résultats dus à M. *A. Berget.*

Mercure	0,02	Fer	0,14
Plomb	0,08	Zinc	0,30
Étain	0,15	Cuivre	1,04

Appareil d'Ingenhouz. — Sur l'une des parois extérieures d'une caisse rectangulaire en laiton sont implantées normalement des tiges de diverses substances et de même diamètre (fig. 329). Ces tiges ont été recouvertes d'une mince couche de cire. Quand on verse de l'eau bouillante dans la caisse, la chaleur de l'eau se transmet le long des tiges et fond la cire jusqu'à des points qui *varient avec les substances* et qui ont la température de fusion de la cire. Sur une tige, la distance de ce point à la caisse croît avec la conductibilité intérieure (1).

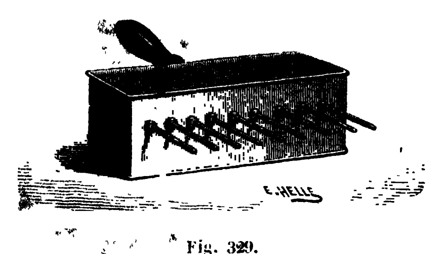


Fig. 329.

Voici l'ordre de conductibilité des métaux usuels : *Argent, Cuivre, Zinc, Fer, Étain, Plomb.* C'est aussi l'ordre de la conductibilité électrique.

319. Propriétés des toiles métalliques. — La conductibilité des métaux explique le rôle des toiles métalliques. Si l'on coupe une flamme avec une toile métallique, la toile enlève aux gaz inflammables une grande partie de leur chaleur, et les refroidit au-dessous de leur température de combustion; la flamme ne persiste qu'au-dessous de la toile (fig. 330). Les gaz traversent cependant la

(1) En effet, à l'*état permanent*, la chaleur n'élève plus la température des molécules d'une tige, mais s'échappe par la surface extérieure. Or, les tiges, recouvertes d'un même enduit, présentent la *même déperdition extérieure* aux points d'égale température. La déperdition extérieure dissipe d'autant moins vite le flux de chaleur qui vient de la source, que ce flux est plus important, aussi la chaleur se propage-t-elle d'autant plus loin sur une tige que sa conductibilité est plus grande.

Il faut toutefois attendre l'*état permanent* pour établir le classement. En effet, la chaleur élève d'abord la température des molécules, et la cire *fond plus vite sur le bismuth que sur le fer*, bien que le fer soit meilleur conducteur, parce que, pour échauffer de 1⁰ l'unité de masse, il faut moins de chaleur pour le bismuth que pour le fer. A l'état permanent, la longueur fondue est *plus grande sur le fer que sur le bismuth.*

toile, car on peut les enflammer au dessus, sans que la combustion se propage au dessous (fig. 331).

Les toiles métalliques garantissent des cornues de verre placées

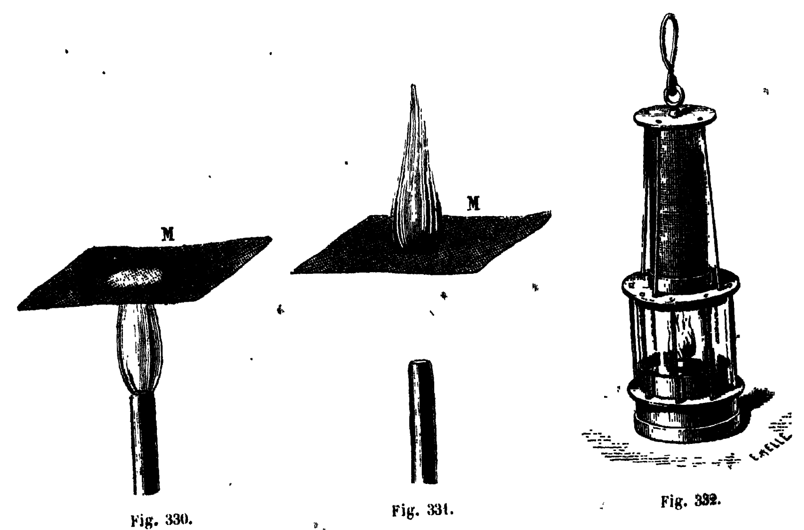


Fig. 330. Fig. 331. Fig. 332.

sur une flamme, en s'opposant à un échauffement trop rapide.

Elles ont reçu une application importante dans la **lampe des mineurs** de Davy. Le formène ou *grisou* des houillères s'accumule dans les parties supérieures des galeries, et son mélange à l'air donne lieu, quand il s'enflamme, à de formidables explosions. La cheminée de verre de la lampe (fig. 332) est surmontée d'un cylindre en toile métallique. Une explosion produite dans la lampe ne se transmet pas à l'extérieur, car les mailles métalliques refroidissent les gaz et s'opposent à la propagation de la flamme.

320. Convection. — Si l'on chauffe un liquide par sa *partie inférieure,* les couches chauffées se dilatent, deviennent plus légères et montent; les couches supérieures, plus lourdes, prennent leur place. De là *deux courants* liquides qu'on met en évidence avec de la sciure de bois : un courant ascendant au centre et un courant descendant le long des parois (fig. 333). Ce transport de chaleur par *convection* égalise les températures.

Dans une masse gazeuse dont les molécules sont plus dilatables et plus mobiles que des molécules liquides, la propagation de la chaleur a lieu aussi par convection.

L'air échauffé au contact d'un poêle s'élève et est remplacé par de

l'air froid. La quantité de chaleur propagée ainsi par convection est proportionnelle à l'*étendue de la surface* et à la différence de température entre le gaz et la surface chaude. Dans les calorifères à vapeur, on obtient une grande surface de transmission sous un volume restreint, en donnant aux tuyaux des nervures saillantes.

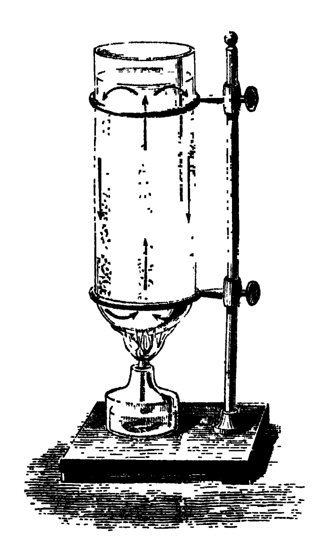


Fig. 333.

321. Conductibilité des liquides. — Sauf le mercure, *les liquides conduisent mal la chaleur*. Pour montrer leur mauvaise conductibilité, on les échauffe par leur partie supérieure, afin d'éviter la convection. Ayant fixé un thermomètre dans la paroi d'une éprouvette (fig. 334), on verse de l'eau jusqu'à quelques millimètres au-dessus du réservoir ; on achève de remplir avec de l'alcool. On enflamme l'alcool, le thermomètre s'élève à peine.

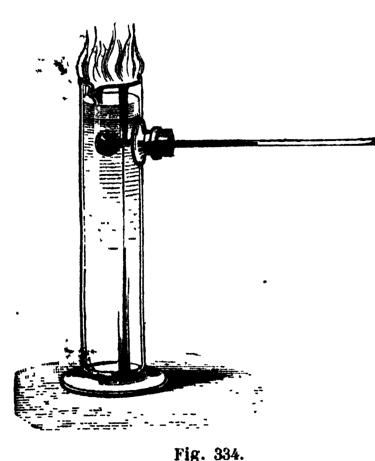


Fig. 334.

C'est dans un liquide peu conducteur, tel que l'huile ou l'eau de chaux, que l'on plonge une pièce d'acier à tremper pour obtenir un refroidissement lent et une trempe douce ; l'eau acidulée et le mercure produisent un refroidissement rapide et une trempe dure.

322. Conductibilité des gaz. — L'hydrogène a une conductibilité appréciable. Les autres gaz sont mauvais conducteurs s'ils sont gênés dans leurs mouvements et si, par conséquent, les courants de convection sont arrêtés.

La protection par les fourrures, les plumes, le duvet, la laine et les étoffes ouatées, ne tient pas seulement à la mauvaise conductibilité des filaments, mais aussi à l'action de l'*air interposé*. L'amiante, la sciure de bois, le feutre constituent des isolants thermiques. L'emploi des couvertures de chaume se justifie d'une manière analogue,

soit pour garantir les habitations du froid en hiver, soit pour prévenir la fusion de la glace dans les glacières en été. Deux vêtements légers superposés garantissent du froid parce qu'ils emprisonnent entre eux une couche d'air. De même les doubles cloisons de bois et les doubles fenêtres servent à protéger les appartements.

La conductibilité *du vide* est nulle.

RAYONNEMENT CALORIFIQUE (1)

323. Rayonnement dans le vide. — La chaleur solaire nous parvient par rayonnement, en traversant un espace *vide* de matière pondérable.

On met en évidence le rayonnement, à travers le vide, des sources à basse température, avec un thermomètre soudé par sa tige dans un ballon de verre où l'on a fait le vide; le réservoir B du thermomètre est noirci et occupe le centre du ballon (fig. 335). *Le thermomètre monte immédiatement quand on plonge le ballon dans l'eau chaude.*

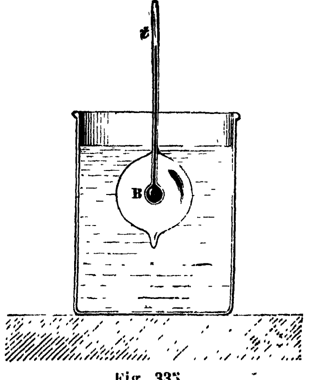


Fig. 335.

Les parois du ballon rayonnent directement à travers l'espace vide qui les sépare du réservoir B (2). Le thermomètre baisse quand on plonge le ballon dans l'eau froide; le thermomètre envoie alors de la chaleur à l'eau. Le rayonnement du froid n'est qu'apparent; un corps froid envoie aux corps environnants moins de chaleur qu'il en reçoit.

APPAREILS DE MESURE

324. Pour les mesures de rayonnement calorifique, on s'est d'abord servi d'un thermomètre ordinaire à réservoir noirci par le noir de fumée. On a employé ensuite un thermomètre très sensible : le *thermomultiplicateur* de Melloni. Dans ce thermomètre, la propriété dont on observe la variation est la *force électromotrice d'une pile thermo-*

(1) En optique on rapprochera les propriétés des radiations calorifiques et des radiations lumineuses.

(2) La transmission n'a pas lieu par une conductibilité solide, car elle est la même si l'on enveloppe de glace la soudure du thermomètre et du ballon.

électrique. Il comprend une pile thermo-électrique et un galvanomètre ou multiplicateur.

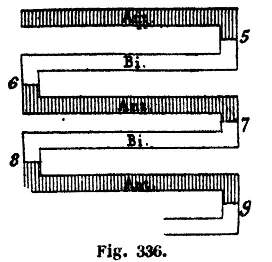


Fig. 336.

Thermomultiplicateur. — La *pile thermo-électrique* est formée de barreaux alternatifs de bismuth et d'antimoine recourbés à angle droit à leurs extrémités et *soudés* (fig. 336). Disposés en rangées parallèles, ces barreaux constituent un parallélipipède rectangle qui présente *sur une de ses faces les soudures paires et sur la face opposée les soudures impaires*. Les faces sont recouvertes d'une mince couche de noir de fumée (1).

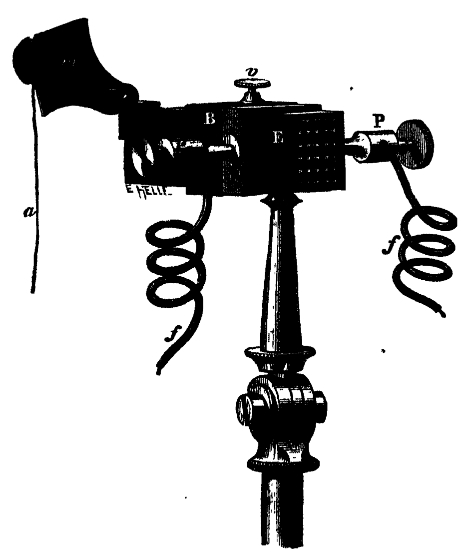


Fig. 337.

On emploie aussi des fils fins de *fer* et de *constantan*. Leur soudure est aplatie et enduite de noir de fumée.

Les deux pôles P de la pile sont réunis par deux conducteurs *f* aux deux bornes d'un *galvanomètre* (fig. 337), pour constituer un circuit électrique fermé.

Si l'on expose l'une des faces de la pile à un rayonnement calorifique, en laissant l'autre à la température ambiante, l'aiguille du galvanomètre est déviée, elle oscille, puis se fixe. La déviation définitive augmente avec la différence de température des deux systèmes de soudures (2).

Une bougie placée à 1 mètre produit un écart notable de l'aiguille. Les *déviations*, si elles restent petites, *sont proportionnelles aux quantités de chaleur reçues en une seconde* par la pile.

Méthode des impulsions. — Quand on fait tomber un faisceau calorifique sur l'une des faces de la pile, une impression superficielle sur la

(1) La pile est logée dans une monture en cuivre E, sur laquelle se fixent, à l'aide de vis de serrage *v*, deux étuis rectangulaires B, munis à leurs extrémités d'écrans mobiles *m*, par lesquels on peut soustraire les soudures aux actions calorifiques extérieures.

(2) Le courant produit a une intensité proportionnelle à la différence de température des deux faces de la pile.

face échauffée dévie immédiatement l'aiguille du galvanomètre. *Sans attendre la déviation définitive*, on observe le premier écart maximum ou l'*impulsion* et on intercepte le rayonnement. La pile ayant été peu chauffée, le retour à l'équilibre est plus rapide que si l'on attendait la déviation fixe et les mesures se succèdent à intervalles rapprochés.

Proportionnalité des quantités de chaleur aux impulsions. — Si *les impulsions ne dépassent pas quelques degrés*, elles sont proportionnelles *aux quantités de chaleur* reçues par seconde par la pile ; on le *vérifie* avec une lentille convergente, recouverte par deux volets semi-circulaires indépendants 1 et 2 (fig. 338). Cette lentille L, portée par une colonne, se place entre une lampe S

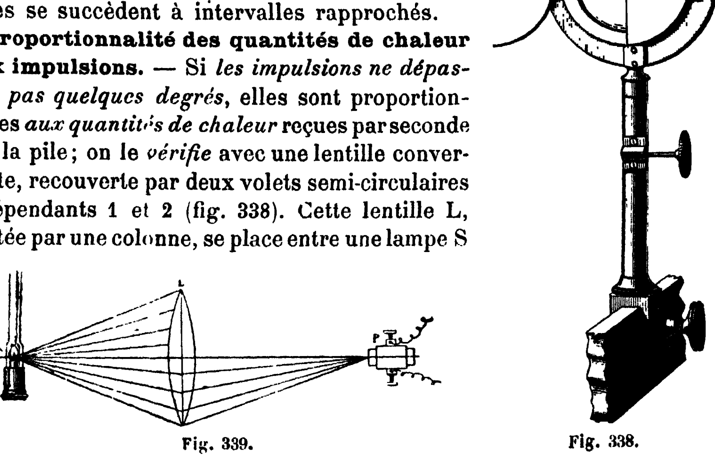


Fig. 339. Fig. 338.

et la pile P dans une position telle qu'une image nette de la flamme se dessine sur la pile (fig. 339).

On observe : 1° une impulsion α quand *l'une des moitiés* de la lentille est découverte (fig. 338) ; 2° une impulsion α quand *l'autre moitié* l'est à son tour ; 3° l'impulsion 2α quand *les deux volets* sont ouverts. L'impulsion double donc comme la quantité de chaleur.

325. Lecture au galvanomètre par la méthode de la réflexion. — Si l'aiguille du galvanomètre était munie d'un index parcourant les divisions d'un cercle de grand rayon, de petits angles d'écart correspondraient à des arcs assez étendus et on pourrait se borner à de petites déviations pour lesquelles la proportionnalité est rigoureuse. La mesure des déviations par la *méthode de la réflexion* réalise cette condition. On fait réfléchir sur un petit miroir vertical plan ou concave M, fixé au support de l'aiguille, les divisions d'une règle circulaire divisée qui a son centre sur le fil (fig. 340).

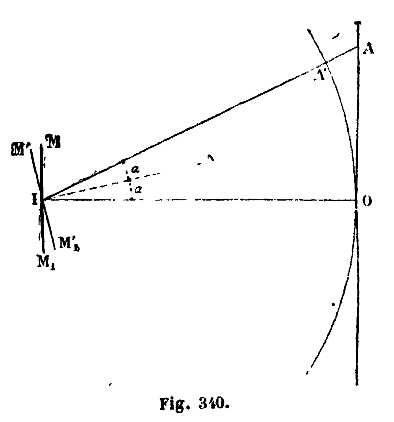


Fig. 340.

Une lunette-viseur (fig. 341) est placée au-dessus de la division O ; avant toute déviation, le miroir réfléchit cette division dans l'axe

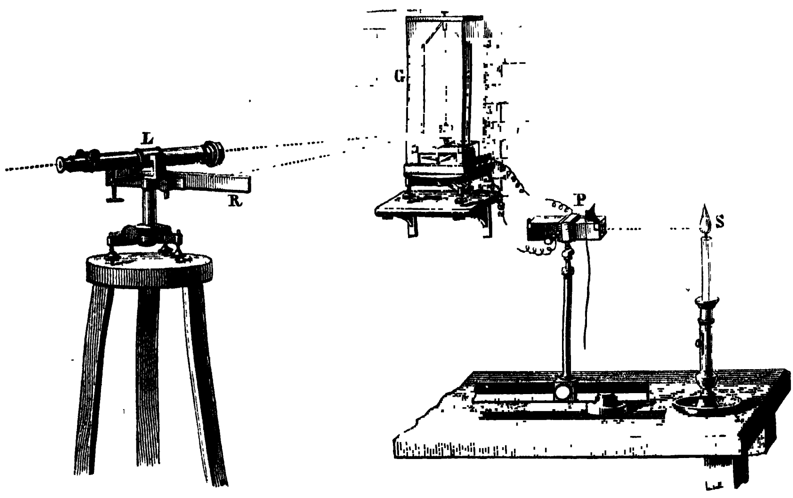


Fig. 341.

OI de la lunette. Le miroir étant dévié avec l'aiguille aimantée, la lunette vise une division A′, l'angle A′IO est *double* de l'angle de déviation (**492** et **804**).

326. Banc de Melloni (fig. 350). — La pile et les pièces qui servent aux expériences sont alignées sur une règle métallique horizontale divisée. Sur cette règle se déplacent des colonnes que l'on fixe avec des vis de pression ; elles supportent : la source S, un écran E pour intercepter à volonté le rayonnement, un diaphragme D pour limiter le faisceau calorifique, la pile P, un écran qui protège la seconde face de la pile.

327. Radiomicromètre. — Dans le radiomicromètre, la pile thermo-électrique se confond avec le galvanomètre en un circuit réduit à un simple cadre métallique. A un fil de quartz est suspendu, comme dans un galvanomètre à cadre mobile (**752**), dans le champ magnétique d'un fort électro-aimant, un petit cadre rectangulaire formé de deux métaux présentant leurs deux soudures sur les branches horizontales du cadre ; la soudure inférieure est aplatie et noircie. Le cadre se tenant en équilibre dans le champ magnétique, si l'on dirige un faisceau calorifique sur la soudure aplatie, le cadre est dévié par le courant thermo-électrique. La lecture de la déviation se fait par réflexion.

328. Bolomètre. — Le bolomètre est un thermomètre extrêmement sensible où le phénomène qui repère la température est la *résistance électrique d'un métal.* Il se compose de deux fils fins de platine, identiques et

noircis, intercalés dans deux des branches d'un *pont de Wheatstone* (**700**). Après avoir établi l'équilibre, l'aiguille du galvanomètre placé dans le pont étant à son zéro, on fait tomber le rayonnement sur l'un des fils, l'autre fil restant à la température ambiante. L'équilibre est rompu; *les déviations du galvanomètre sont proportionnelles aux quantités de chaleur reçues dans l'unité de temps par le fil* (1). Le fil exposé au rayonnement remplace la pile thermo-électrique sur le banc de Melloni.

GÉNÉRALITÉS SUR LA PROPAGATION DE LA CHALEUR

329. Dans un milieu homogène, la chaleur se propage en ligne droite. — Entre une pile et une source, on place des écrans percés de petites ouvertures en ligne droite, la pile s'échauffe; l'échauffement cesse si l'on déplace une des ouvertures.

On appelle **rayon de chaleur** une des lignes droites que suit la chaleur émanée d'un point. Les différents points d'un corps chaud émettent des rayons de chaleur de toutes directions.

La **vitesse de propagation** du rayonnement calorifique dans le vide est la vitesse de propagation de la lumière (300.000 kilomètres).

330. Loi du carré des distances. — En faisant agir, normalement sur une pile thermo-électrique, une même source à des distances D et D′, on observe au galvanomètre des déviations α et α' qui sont proportionnelles aux quantités de chaleur q et q' reçues dans le même temps par la surface de la pile. On trouve

$$\frac{\alpha}{\alpha'} = \frac{D'^2}{D^2}, \qquad \text{donc } \frac{q}{q'} = \frac{D'^2}{D^2}.$$

La quantité de chaleur reçue normalement par une surface varie donc en *raison inverse du carré de la distance* à la source.

331. Intensité d'une source. — L'intensité d'une source calorifique est *la quantité* I *de chaleur* que cette source *envoie, par seconde, sur une surface égale à un centimètre carré, placée à l'unité de distance* et recevant normalement les rayons.

La quantité de chaleur reçue normalement sur un centimètre carré à la distance d est $\frac{I}{d^2} = E$.

332. Loi du refroidissement de Newton. — Quand un corps se trouve dans une enceinte à température moins élevée que la sienne, il se refroidit. Le refroidissement dépend à la fois de la nature de la surface

(1) L'élévation de température dépend de la capacité calorifique du fil. L'appareil est très sensible avec un fil de faible masse (par exemple : 10µ de diamètre et 1cm5 de longueur).

du corps qui se refroidit (*pouvoir émissif*), de la nature et de la pression du *gaz ambiant*. Sans faire de distinction entre ces influences, on a reconnu que si l'*excès de la température* T du corps sur la température t de l'enceinte ne dépasse pas une vingtaine de degrés, les abaissements successifs, T — T', de température, pour de petits intervalles de temps θ, sont proportionnels à ces temps et aux excès moyens pendant ces temps :

$$T - T' = A\,\theta \left[\frac{T + T'}{2} - t\right]$$

$\frac{T - T'}{\theta}$ ou $\frac{\Delta T}{\Delta\theta}$ est la *vitesse moyenne de refroidissement* par seconde (1).
Elle est proportionnelle à l'excès de température du corps sur l'enceinte.

$$\frac{\Delta T}{\Delta\theta} = A\,(T - t).$$

Pour un intervalle de temps très court, on remplace $\frac{T + T'}{2}$ par T.

La vitesse A de refroidissement pour un excès de température de 1° du corps chaud sur l'enceinte est constante (2).

La *quantité de chaleur* transmise par un corps chaud à une enceinte, est proportionnelle à sa surface et à l'excès de sa température sur celle de l'enceinte (3).

Propriétés des corps relativement à la chaleur rayonnante. — Un flux calorifique qui tombe sur un corps se divise en plusieurs parties :

1° Une partie réfléchie *régulièrement;* 2° une partie réfléchie irrégulièrement ou *diffusée;* 3° une partie *réfractée;* 4° une partie *transmise;* 5° une partie *absorbée,* qui échauffe le corps.

RÉFLEXION DE LA CHALEUR

333. Lois géométriques de la réflexion. — Un rayon de chaleur se réfléchit sur une surface polie, suivant une direction déterminée. Les lois géométriques de la réflexion sont les mêmes que pour la lumière (**443**) : 1° *Le rayon réfléchi reste dans le plan d'incidence;* 2° *l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.*

Vérification. — Sur le banc de Melloni (fig. 343) est placée une colonne K supportant une plate-forme horizontale circulaire, divisée en degrés. Au centre de cette plate-forme, on pose perpendiculairement un miroir métallique M, à la même hauteur que la source de chaleur S. Le pied de la plate-forme, fixé sur le banc, soutient une règle auxiliaire R

(1) C'est la vitesse moyenne du mercure sur la tige thermométrique.
(2) Si l'excès dépasse une vingtaine de degrés, A augmente avec l'excès.
(3) La *vitesse de réchauffement* d'un corps placé dans un milieu plus chaud est également proportionnelle à l'excès de température, si cet excès est petit.

mobile autour de la même verticale que le miroir et portant une pile thermo-électrique P. On dirige cette règle de telle façon que les rayons émis

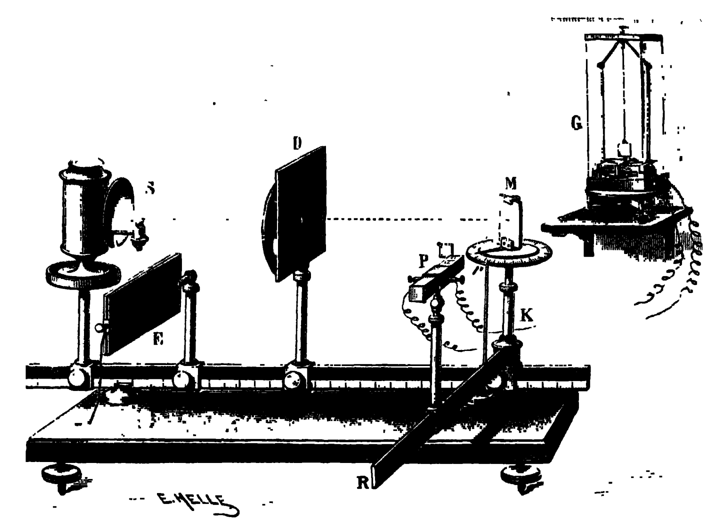


Fig. 343.

par la source S tombent sur la pile après leur réflexion sur le miroir M; le faisceau réfléchi a alors son *maximum d'intensité*. Dans cette position de la pile, le faisceau incident et l'axe de la pile sont dirigés suivant deux rayons du cercle divisé. On vérifie, sur la division de la plate-forme, l'égalité des angles de la normale au miroir (figurée par une pointe) avec la direction de la règle principale et avec la direction de la règle auxiliaire.

Le rayon incident et le rayon réfléchi sont dans un même plan horizontal avec la normale au miroir M.

Les lois de la réflexion se vérifient par les miroirs sphériques.

Miroirs ardents. — Les miroirs ardents sont des miroirs sphériques concaves dont on dirige l'axe vers le centre du soleil. La chaleur solaire se concentre au foyer avec la lumière, elle peut y enflammer des substances combustibles, y fondre des métaux (fig. 344). On a appliqué de grands miroirs métalliques concaves à l'utilisation de la chaleur solaire.

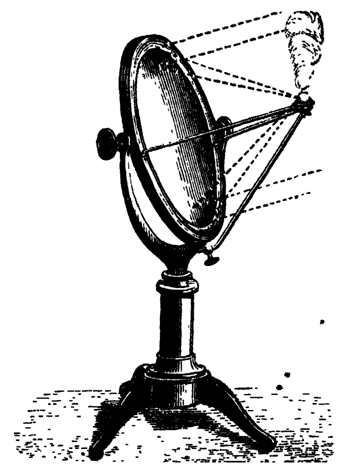


Fig. 344.

Miroirs conjugués. — On installe en regard l'un de l'autre, à dis-

tance, deux miroirs sphériques concaves M et M′ *dont les axes coïncident.* Au foyer principal F du miroir M, on place la flamme d'une bougie : les rayons réfléchis parallèlement à l'axe des deux miroirs, tombent sur le deuxième miroir M′ parallèlement à son axe et forment, après réflexion, à foyer F′ une image sur un petit écran.

La situation des deux foyers étant reconnue, si l'on dispose au foyer F un arc électrique C ou une corbeille métallique renfermant des charbons en combustion (fig. 345), on voit s'enflammer de l'a-

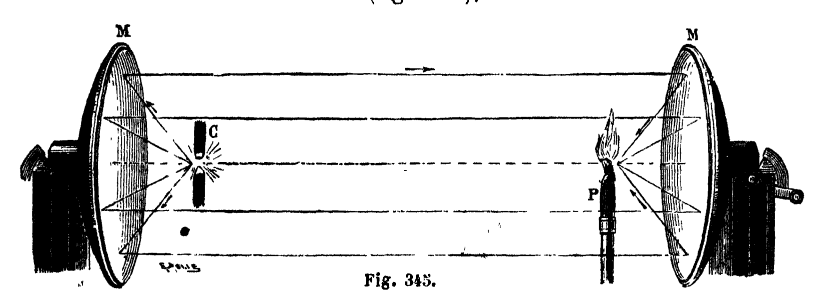


Fig. 345.

madou ou du fulmi-coton placé en F′ sur un support P. On a masqué l'un des deux miroirs quand on plaçait les corps combustibles en F′. L'inflammation n'a pas lieu quand on dévie un peu l'axe de l'un des miroirs, ou quand on interpose un écran entre la source calorifique et le miroir M, bien que de la chaleur se transmette directement de F en F′.

Quand on remplace les charbons ardents par un bloc de glace, un thermomètre placé au second foyer baisse, car il envoie en F plus de chaleur qu'il n'en reçoit (*réflexion apparente du froid*).

334. Pouvoir réflecteur. — On appelle pouvoir réflecteur d'un miroir le *rapport de la chaleur réfléchie à la chaleur incidente.*

Le pouvoir réflecteur d'un miroir se détermine avec l'appareil de Melloni et se déduit de deux observations :

1° La règle mobile étant placée *en prolongement* de la règle principale, la pile reçoit directement le faisceau incident. On note une déviation *a*.

2° Le miroir est installé verticalement au centre de la plate-forme (fig. 343) ; on fait tourner la règle mobile R et on amène l'axe de la pile *dans la direction du faisceau réfléchi.* On a une déviation *a′*.

Le rapport $\frac{a'}{a}$ (pour de petites déviations) est égal au pouvoir réflecteur.

Le pouvoir réflecteur est *plus grand pour les radiations obscures* que pour les radiations lumineuses. Pour une même radiation, le pouvoir réflecteur varie avec l'incidence : peu avec les métaux polis, beaucoup avec les substances analogues au verre.

Diffusion. — Les substances non polies renvoient la chaleur, comme la lumière, dans toutes les directions.

TRANSMISSION DE LA CHALEUR

335. Un corps transparent pour les rayons calorifiques est dit *diathermane*. Un corps opaque pour la chaleur est dit *athermane*. Un rayonnement calorifique traverse une substance diathermane sans l'échauffer; absorbé par une substance athermane, il élève sa température. Un rayon calorifique est réfracté quand il traverse obliquement une substance diathermane.

RÉFRACTION DE LA CHALEUR

336. Les lois géométriques de la réfraction de la chaleur par les substances transparentes sont celles de la réfraction de la lumière (**465**) (*loi du plan d'incidence* et *loi des sinus*). Ces lois conduisent comme pour la lumière : à la concentration par une *lentille*, à la déviation et à la décomposition par un *prisme*.

Décomposition de la chaleur solaire par un prisme. — Avec une lentille convergente en *sel gemme*, on projette sur un écran l'image nette S′ d'une fente fine S éclairée par les rayons solaires. Avant de former cette image, les rayons qui sortent de la lentille sont reçus par un prisme P en *sel gemme* dont l'arête réfringente est parallèle à la fente (fig. 346); ce prisme, au minimum de déviation, décompose l'image de la fente et l'allonge perpendiculairement à son arête. Dans ce spectre lumineux, on promène une

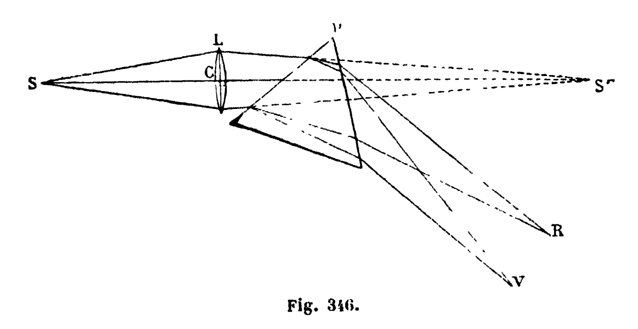


Fig. 346.

pile thermo-électrique linéaire, montée sur la règle mobile R du banc de Melloni (fig. 348). La pile, formée d'une ligne de soudures

parallèles à la fente et à l'arête réfringente (fig. 347), n'admet qu'une faible partie du faisceau dispersé.

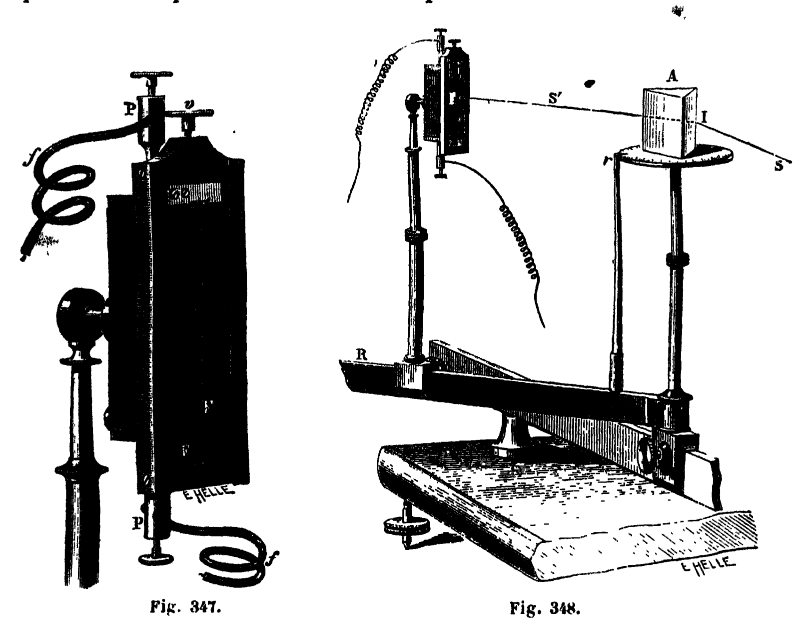


Fig. 347. Fig. 348.

Dans le violet, la pile accuse peu de chaleur; la chaleur augmente à mesure qu'on se rapproche du rouge et persiste jusqu'à une certaine distance dans la région obscure infra-rouge.

La pile peut être remplacée par le fil d'un bolomètre.

337. Distribution de la chaleur dans un spectre prismatique solaire. — En portant sur une ligne horizontale une longueur égale à l'étendue du spectre calorifique obtenu et en élevant sur cette droite des perpendiculaires proportionnelles aux déviations successives de la pile thermo-électrique, les extrémités de ces ordonnées figurent la distribution de la chaleur le long du spectre. La courbe offre un *maximum* accentué M dans la partie obscure infra-rouge (fig. 349). *Un faisceau solaire comprend donc des rayons calorifiques décomposables en un spectre comme les rayons lumi-*

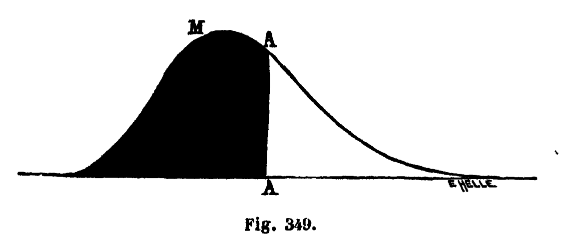


Fig. 349.

neux. Ce spectre offre des rayons de même réfrangibilité que les rayons lumineux, et, *en outre,* des rayons *invisibles moins réfrangibles.*

Dans le spectre normal produit par un *réseau* (**561**), le maximum calorifique n'occupe pas la même position, pour une même source, que dans un spectre prismatique.

338. Spectres calorifiques de diverses sources. — Les sources lumineuses artificielles : bec de gaz, lampe à pétrole, et tous les corps incandescents présentent un spectre lumineux. Les radiations lumineuses de ces spectres sont en même temps calorifiques, principalement dans la partie la moins réfrangible et il y a un prolongement calorifique obscur, moins dévié que le rouge.

Les sources calorifiques non lumineuses ne donnent qu'un *spectre obscur,* moins dévié que le rouge.

Quand on fait passer dans un fil de platine un courant électrique d'intensité graduellement croissante, le spectre du fil ne présente d'abord que des rayons obscurs calorifiques. Vers 500° le fil devient rouge sombre, et une bande rouge apparaît dans le spectre; puis de l'orangé apparaît. Quand le fil a atteint le blanc, le spectre s'étend jusqu'au violet. La chaleur reçue par une pile linéaire décroît du rouge au violet.

POUVOIRS DIATHERMANES

339. Le pouvoir diathermane d'une substance, pour une source calorifique donnée, est *le rapport entre la quantité de chaleur transmise et la quantité de chaleur incidente.* Un pouvoir diathermane s'obtient par les deux mesures suivantes (fig. 350) :

1° On reçoit sur la pile P le rayonnement *direct* de la source S et on note la déviation α du galvanomètre.

2° Entre la source S et la pile on *interpose* une lame L de la substance, à faces parallèles, placée verticalement sur un support; on note la déviation α'. Le rapport $\frac{\alpha'}{\alpha}$ est le pouvoir diathermane de la lame L.

Les pouvoirs diathermanes dépendent de la nature de la source calorifique, de la nature de la substance, et de son épaisseur.

Influence de la nature de la source. — Sous une même épaisseur, la transparence d'une même substance diathermane varie avec la réfrangibilité de la chaleur incidente.

Une lame de *verre* est opaque pour les rayons obscurs très peu réfrangibles, émis par un corps à 100°; elle se laisse mieux tra-

verser par les rayons obscurs voisins du rouge; enfin, elle est transparente pour la chaleur lumineuse.

Application aux serres. — On comprend comment une serre

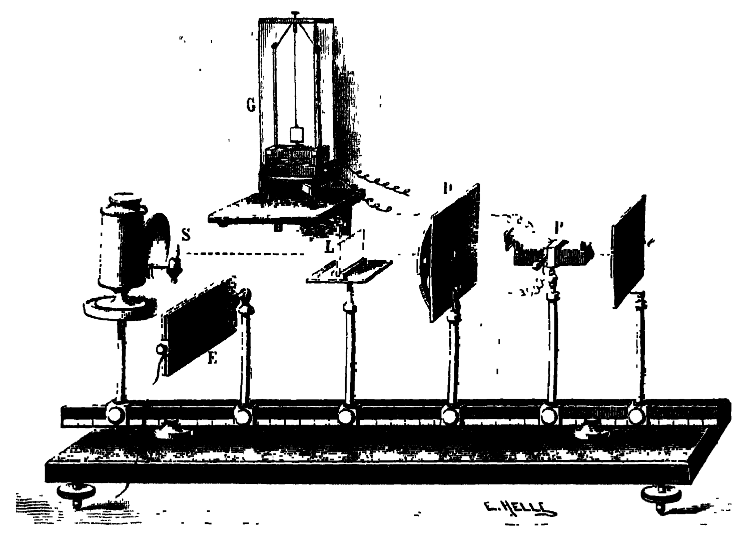


Fig. 350.

vitrée exposée au Midi se maintient à une température élevée. La partie lumineuse de la chaleur *solaire traverse les vitres et échauffe les corps qu'elle rencontre à l'intérieur.* Ceux-ci n'émettent que des rayons obscurs de faible réfrangibilité qui, arrêtés par les vitres, s'accumulent dans l'enceinte et en élèvent la température. L'explication est la même pour les cloches et les châssis employés en *jardinage pour accélérer la végétation.*

Influence de la nature de la substance. — Substances transparentes. — Les substances qui sont transparentes pour la chaleur lumineuse, absorbent pour la plupart une notable partie de la chaleur obscure. Le *verre* est opaque pour les rayons obscurs peu réfrangibles, l'*alun* arrête presque toute la chaleur obscure, l'*eau* est également athermane pour les rayons obscurs; il en est de même pour les liquides de l'œil. Si donc la rétine était sensible aux rayons obscurs, ceux-ci ne pourraient l'impressionner puisqu'ils ne lui parviennent pas.

Rôle météorologique de la vapeur d'eau. — L'*air sec* est diathermane, les rayons solaires le traversent sans l'échauffer, mais la *vapeur d'eau* arrête, en grande proportion, la chaleur obscure.

Par cette propriété, l'air humide atmosphérique nous protège pendant le jour contre une insolation trop vive en absorbant une grande partie des radiations obscures. La chaleur obscure, que le sol échauffé émet pendant la nuit, est à son tour partiellement arrêtée par la vapeur d'eau atmosphérique qui nous préserve ainsi d'un refroidissement trop accentué. Dans les contrées sèches, la température subit les plus fortes variations du jour à la nuit (Sahara, Asie centrale) et, c'est dans les îles de petite étendue que les variations sont les plus faibles.

Sel gemme. — Le sel gemme est transparent et incolore *pour toutes les radiations,* aussi emploie-t-on une lentille et un prisme de sel gemme pour l'analyse d'un faisceau calorifique. Le spectre calorifique obscur est beaucoup moins étendu avec une lentille et un prisme de verre. Des vitres en sel gemme ne préserveraient pas les appartements contre la déperdition de la chaleur intérieure.

Substances non transparentes. — Les substances opaques pour la lumière le sont aussi pour la chaleur correspondante, mais il y a des corps opaques qui arrêtent la chaleur lumineuse et laissent passer la chaleur obscure : *dissolution d'iode dans le sulfure de carbone,* mince lame d'ébonite, etc.

Interposition de deux lames différentes. — Une lame d'*alun* arrête la chaleur obscure, une lame de *sel gemme enfumée* arrête la chaleur lumineuse; *l'ensemble des deux lames intercepte tout le* rayonnement. Des effets analogues sont produits en lumière par les verres colorés. Un verre rouge ne transmet que le rouge, un verre de couleur verte ne transmet que le vert. Leur superposition arrête toute la lumière.

ABSORPTION DE LA CHALEUR

340. La chaleur absorbée est celle qui n'est ni réfléchie, ni diffusée, ni transmise. Le **pouvoir absorbant** d'un corps est *le rapport de la chaleur absorbée à la chaleur incidente.*

Pour un métal poli, la chaleur absorbée est faible, elle est la différence entre la chaleur incidente et la chaleur régulièrement réfléchie; comme le pouvoir réflecteur, le pouvoir absorbant dépend de l'angle d'incidence et de la réfrangibilité de la radiation.

Le *noir de fumée* ne réfléchit et ne diffuse aucune espèce de chaleur; son pouvoir absorbant est égal à l'unité pour toutes les radiations. En recouvrant de noir de fumée les faces des piles thermo-

électriques, l'absorption par la face exposée au rayonnement est la même pour toutes les radiations. Les terres noires s'échauffent plus en été que les terres blanches, et les vêtements noirs absorbent mieux les rayons solaires que les vêtements blancs.

ÉMISSION DE LA CHALEUR

341. La chaleur émise par un corps croît avec son excès de température sur le milieu ambiant et, à une même température, dépend de la nature de la surface du corps. Le noir de fumée mat est le corps qui, à une température déterminée, émet le plus de chaleur.

On appelle **pouvoir émissif** *d'une substance le rapport de la quantité de chaleur émise par cette substance à celle qui est émise par une surface égale de noir de fumée à la même température.*

Mesure des pouvoirs émissifs. — Sur un banc de Melloni, à la hauteur de la pile thermo-électrique et à une certaine distance, on dispose un cube creux C dont les faces verticales sont recouvertes respectivement de

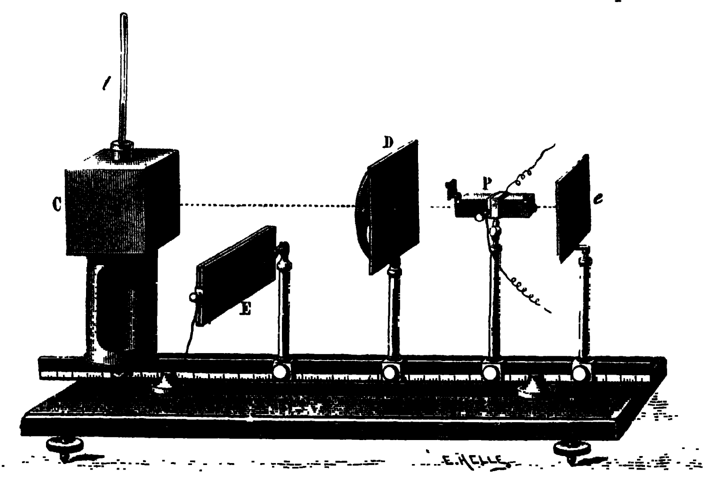


Fig. 351.

noir de fumée et de différentes substances. Ce cube contient de l'huile chaude dont on maintient la température constante (fig. 351).

On fait rayonner successivement vers la pile les *diverses faces* du cube. Les déviations du galvanomètre mesurent les quantités de chaleur émises pendant un même temps par des surfaces *d'égale étendue,* à la même température.

POUVOIRS ÉMISSIFS A 100°

Noir de fumée	1
Argent mat	0,54
Argent poli	0,025

Les *métaux polis* ont un pouvoir émissif très faible; aussi un liquide se maintient longtemps chaud dans un vase d'argent ou de cuivre poli. Un métal noirci se refroidit au contraire vite. On noircit les tuyaux de poêle pour qu'ils émettent plus de chaleur.

Égalité des pouvoirs émissifs et des pouvoirs absorbants. — Pour des faisceaux calorifiques de même indice de réfraction, il y a égalité entre le pouvoir émissif d'une substance et le pouvoir absorbant, tous les deux rapportés au noir de fumée. Cette égalité (*loi de Kirchhoff*) s'applique aux corps *noirs* et aux corps dits *colorés*.

342. Mesure de la chaleur solaire. — Une boîte plate en laiton mince est remplie d'eau; on y plonge un thermomètre. Une des faces, de surface connue, est recouverte de noir de fumée; elle est exposée normalement aux rayons solaires pendant un temps déterminé. L'élévation de température de l'eau permet de calculer le nombre de calories reçues en une seconde, par centimètre carré de la surface chauffée.

La Terre ne reçoit qu'une fraction extrêmement petite de la radiation solaire totale. Si cette fraction était uniformément répartie sur tout le globe et employée à fondre de la glace, la couche fondue en un an, envelopperait la Terre, sur une épaisseur de 35 mètres.

APPLICATIONS DES LOIS DE LA CHALEUR

MÉTÉORES AQUEUX

343. ROSÉE. — On appelle rosée les gouttelettes d'eau que l'on aperçoit quelquefois le matin sur des corps placés à découvert et particulièrement à la surface des parties vertes des plantes.

La rosée *ne tombe point;* ce n'est pas dans l'air que la vapeur se condense, car la rosée n'est pas accompagnée de brouillard, mais elle se forme aux points mêmes où on l'observe, par condensation de l'humidité atmosphérique *au contact* de certains corps.

Influence du pouvoir émissif et de la conductibilité. — La nuit, par un ciel clair, les corps de la surface du sol se refroidissent en rayonnant, si leur *pouvoir émissif est grand* et surtout si leur *conductibilité est faible,* car ils n'empruntent pas alors, par conduction, de chaleur au sol qu'ils touchent.

La rosée n'apparaît pas sur les métaux polis dont le pouvoir émissif est très faible. Les corps mats et surtout les *plantes vertes,* dont le pouvoir émissif est grand et la conductibilité médiocre, se refroi-

dissent plus que le sol qui les porte; l'air se refroidit à leur contact et s'il renferme assez de vapeur d'eau pour qu'elle devienne saturante à la température du corps froid (1), cette vapeur se condense *comme sur une carafe froide ou sur un hygromètre de condensation.*

L'humidité atmosphérique se dépose sur les corps refroidis par rayonnement sous forme de gouttelettes (2), qui se réunissent ensuite en une mince nappe d'eau superficielle.

* Si la température de l'air n'est que de quelques degrés au-dessus de zéro, le refroidissement peut être assez grand pour que l'eau déposée par la rosée se congèle, ce qui produit la *gelée blanche.*

Exposition et état du ciel. — La rosée ne se dépose pas sous un abri. Un *écran* protège un corps qui rayonne, la chaleur perdue par rayonnement étant à peu près compensée par la chaleur rayonnée par l'écran. Aussi la rosée cesse de se déposer s'il y a des nuages. Au printemps, on préserve les *jeunes pousses* de la gelée blanche par des abris ou par d'*épaisses fumées de matières goudronneuses* en combustion.

Agitation de l'air. — Il n'y a pas de rosée si le vent renouvelle l'air très vite; l'air ne prend pas alors la température des corps qu'il touche et ne se refroidit pas assez pour leur céder sa vapeur d'eau. Cependant, une *légère agitation* de l'air favorise la production de la rosée, car différentes couches d'air viennent successivement se dépouiller de leur humidité.

344. NUAGES. — L'air contient de la vapeur d'eau invisible; une partie de cette vapeur peut perdre sa transparence en se condensant par refroidissement et former un nuage, ou *un amas de gouttelettes extrêmement petites.* Ces gouttelettes, plus lourdes que l'air, tombent, mais elles ne tombent que lentement, en vertu de la résistance de l'air (**89**). *L'immobilité des nuages dans le sens vertical n'est donc qu'apparente. Les nuages se transforment continuellement, leur partie inférieure repasse à l'état de vapeur invisible dans des couches plus chaudes, et leur partie supérieure s'accroît par de nouvelles condensations.*

La température décroissant rapidement quand l'altitude croît, la vapeur d'eau reste confinée dans les couches inférieures de l'atmosphère et la *hauteur* des nuages ne dépasse guère 2.000 mètres.

---

(1) Une grande différence entre les températures de l'air le jour et la nuit (printemps et automne) est favorable à la production de la rosée.

(2) La forme sphérique est la forme que prend un ensemble de molécules liquides abandonné à ses forces de cohésion.

Variétés de nuages. — On appelle **cirrus** des nuages très élevés, atteignant jusqu'à 10 kilomètres de hauteur, semblables à des filaments déliés, et formés de neige ou de glace; **cumulus** de gros nuages blancs, arrondis, entassés les uns sur les autres; **stratus** des bandes horizontales occupant souvent l'horizon au coucher du soleil; **nimbus** des nuages confondus couvrant un grande partie du ciel.

Formation des nuages. — Si un courant d'air chaud et humide est transporté dans une couche froide de l'atmosphère, sa température s'abaisse et elle n'est plus capable de garder toute sa vapeur d'eau : de là une *précipitation de vapeur* et formation d'un nuage. Si une couche d'air s'élève, sa pression diminue; de là une *détente* qui entraîne à elle seule un refroidissement et une condensation. Parmi les causes de formation de nuages, citons encore le *mélange de deux courants* d'air, l'un froid, l'autre chaud et humide.

C'est dans les climats marins que se produisent principalement les condensations atmosphériques des nuages; par la chaleur que la vapeur d'eau abandonne en devenant liquide, les refroidissements sont rendus moins brusques que sur les continents. D'autre part, les nuages protègent plus efficacement contre le rayonnement que la vapeur d'eau invisible (**343**).

Brouillards. — Les nuages qui naissent *au voisinage du sol* prennent le nom de *bouillards*. Au sein d'un nuage, sur le flanc d'une montagne, et au milieu d'un brouillard en plaine, on éprouve la même impression. Les brouillards formés le long des rivières ou sur le sol des prairies, sont dissipés le matin par les rayons du soleil qui élèvent la température de l'air et augmentent ainsi son pouvoir dissolvant pour la vapeur d'eau.

Un brouillard se forme plus aisément lorsque l'air contient des poussières qui servent d'amorce à la formation des gouttelettes d'eau.

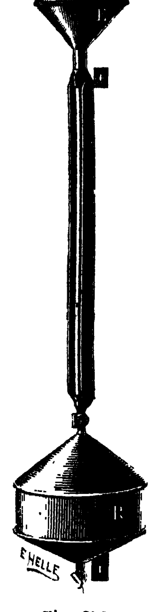
345. PLUIE. — La pluie résulte de la *chute des nuages*. Les gouttelettes se réunissent et forment des gouttes.

Ou bien ces gouttes diminuent de volume en traversant des couches inférieures sèches et le nuage se dissipe.

Ou bien ces gouttes traversent des couches inférieures saturées d'humidité et moins froides, elles condensent de la vapeur à leur surface, grossissent, tombent plus vite et atteignent le sol.

Le mouvement de l'air détermine la pluie en transportant des couches d'air chargées de vapeur d'eau; ainsi en France les vents d'ouest, chargés d'humidité par leur passage sur l'océan, amènent fréquemment la pluie. Sans ce transport, l'air se saturerait au-des-

sus des nappes d'eau et il y pleuvrait à chaque refroidissement; l'air resterait sec sur la terre ferme et il n'y pleuvrait jamais.



La quantité de pluie tombée en un lieu déterminé se mesure dans un *pluviomètre;* c'est un large entonnoir circulaire E placé horizontalement à découvert au-dessus du sol; l'eau reçue passe dans un récipient R qui la préserve de l'évaporation (fig. 352). On fait écouler cette eau dans un vase cylindrique V, muni latéralement d'un tube de verre divisé qui sert d'indicateur de niveau (fig. 353). La hauteur de la colonne d'eau tombée s'obtient en *divisant le volume recueilli par la surface de l'entonnoir.*

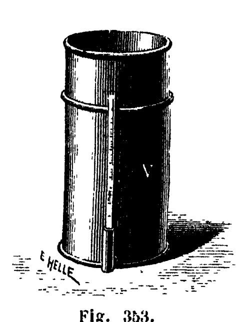


Fig. 352. Fig. 353.

La hauteur d'eau tombée décroît de l'équateur aux pôles, parce que la vaporisation de l'eau de la mer a lieu surtout dans les régions chaudes et parce que le poids de vapeur d'eau que l'air peut contenir augmente avec la température. Dans la direction des vents dominants, la hauteur d'eau tombée diminue avec la distance à la mer, l'air transporté se dépouillant de son humidité.

Si l'eau tombée ne s'infiltrait pas dans le sol et n'éprouvait pas de perte par évaporation, elle formerait à Paris *en une année* une couche de 60 centimètres de hauteur; vers l'équateur la hauteur peut dépasser 3 mètres.

Neige. — La neige est de l'*eau solidifiée en petits cristaux* enchevêtrés : ces cristaux proviennent de la congélation de la vapeur des nuages, quand leur température s'abaisse au-dessous de zéro. En tombant, la neige se liquéfie souvent dans des couches d'air inférieures plus chaudes et nous arrive à l'état de pluie.

Givre. — Le givre, dû à la *congélation de l'eau d'un brouillard* épais, reste suspendu en hiver aux branches des arbres.

Verglas. — Le verglas résulte de la *congélation de la pluie sur un sol refroidi;* il forme une surface glissante de glace unie et transparente.

Grêle. — La grêle est formée de *grains de glace compacts,* en couches concentriques, qui tombent aux heures chaudes de la

journée, au printemps et en été, surtout au début des orages. On a cru prévenir dans une certaine mesure la formation de la grêle par l'emploi de *fusées* qui vont éclater dans les nuages orageux.

MÉTÉORES GAZEUX

346. VENTS. — Si à tout instant la pression atmosphérique était partout la même, les vents n'existeraient pas. Le vent est *de l'air mis en mouvement par la rupture de l'équilibre* de l'atmosphère, due à une différence de pression entre deux masses d'air voisines. Le vent souffle de la région où la pression est plus élevée vers celle où elle est moindre. Les principales causes des variations de pression sont les inégalités de la température et les transformations de la vapeur d'eau.

Inégalités de température. — Sur une surface échauffée par le soleil, l'air diminue de densité et par conséquent de pression jusqu'à une certaine hauteur. Au voisinage du sol la pression est moindre dans une région chaude, plus grande dans une région froide : *un vent superficiel se dirige de la région moins échauffée vers la région plus échauffée.* A un niveau assez élevé, la pression est au contraire plus forte du côté chaud et *un vent supérieur souffle de la région chaude vers la région froide.*



Fig. 354.

Ce double mouvement de l'air est mis en évidence par une expérience vulgaire. Si l'on ouvre une porte qui fait communiquer une chambre chauffée avec une salle froide, au bas de la porte la flamme d'une bougie s'infléchit par un courant d'air dirigé de la salle froide vers la salle chaude ; au milieu de la porte, l'air est stationnaire et la flamme reste droite ; dans le haut, la direction de la flamme indique un courant d'air de la chambre chaude vers la salle froide (fig. 354).

Transformations de la vapeur d'eau. — L'air se précipite en coups de vent vers une région où la pluie a fait baisser la pression. L'augmentation de pression qui provient de l'évaporation d'une grande quantité d'eau détermine un écoulement d'air humide vers des régions sèches.

Direction et vitesse du vent. — La ***direction*** du vent s'observe par l'entraînement de corps légers : poussières, fumées, nuages, ou avec une girouette équilibrée.

La ***vitesse*** du vent se mesure avec un *anémomètre,* moulinet à ailettes très mobiles que le vent fait tourner ; on détermine avec un compteur le nombre de tours par seconde. Le vent est dit faible pour une vitesse inférieure à 4 mètres par seconde ; dans les cyclones la vitesse dépasse 25 mètres.

347. Vents périodiques. — Les ***brises*** sont des vents périodiques qu'on observe au bord de la mer et qui changent deux fois de sens par jour. Vers 9 heures du matin, quand la température de la mer est inférieure à celle de la côte, une *brise de mer,* voisine du sol, souffle *du large vers la terre.* Le soir, la température de la côte étant devenue inférieure à celle de la mer, une *brise de terre* souffle au voisinage du sol, de la terre vers la mer. Les brises cessent de se faire sentir à une petite distance des côtes, elles sont utilisées par les pêcheurs pour leurs départs et leurs retours.

Les **moussons** sont des vents périodiques qui soufflent dans la mer des Indes. La mousson de printemps *souffle de la mer vers le continent d'avril en octobre,* alors que la température de la mer est moins élevée que celle du continent ; la mousson d'automne souffle *du continent, d'octobre en avril,* quand la température du continent est plus basse. Les voiliers utilisaient les moussons pour aller du cap de Bonne-Espérance aux Indes en été ; ils revenaient en hiver.

348. Vents constants. — Les vents constants les plus remarquables sont les **alizés**. Sur une zone parallèle à l'équateur de 500 kilomètres environ de largeur, le soleil frappe presque verticalement la terre de ses rayons et produit une température uniforme, très élevée, où l'air est calme. C'est la *zone des calmes équatoriaux.* L'air échauffé s'élève en masse.

Vers cette zone chaude, affluent des régions tropicales ***deux courants*** appelés alizés. A une hauteur qui dépasse plusieurs kilomètres, ***deux courants supérieurs*** appelés **contre alizés** se dirigent vers les pôles. Les contre alizés s'infléchissent graduellement vers le sol. Les alizés et les contre alizés soufflent régulièrement toute l'année.

Si la terre était immobile, ces vents souffleraient perpendiculaire-

ment à l'équateur. *La rotation de la terre dévie les alizés.* En effet, chaque point du globe décrivant en 24 heures un parallèle autour de la ligne des pôles PP′ (fig. 355), la vitesse linéaire croît sur les parallèles les plus étendus ou à mesure qu'on se rapproche de l'équateur. L'alizé qui vient du tropique de l'hémisphère nord et se dirige du nord au sud vers l'équateur participe à la rotation de la terre et a une vitesse linéaire inférieure à celle des points vers lesquels il se dirige; il leur paraît souffler du nord-est suivant Av_1 (fig. 355) (1). Dans l'hémisphère austral, l'alizé souffle du sud-ouest. C'est l'inverse pour les contre alizés.

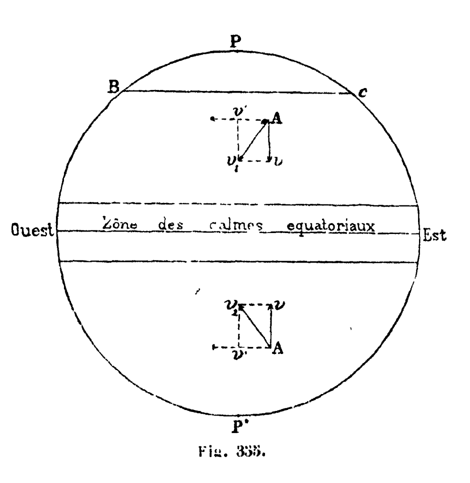


Fig. 355.

La circulation des vents ne se limite pas à la région équatoriale, et son étude générale est complexe; elle est en outre troublée par des phénomènes accidentels qui affectent la forme de tourbillons. Les plus importants sont les cyclones et les bourrasques.

349. CYCLONES. — Les cyclones sont de vastes tourbillons de très grand diamètre; ils prennent naissance dans les parages de l'équateur et sont dus à la *rotation* de l'air autour d'un axe vertical. Dans l'hémisphère nord, la rotation de l'air autour du centre a lieu de l'est à l'ouest en passant par le nord. Au *centre du cyclone* règne un *calme* d'une étendue variable où le baromètre est très bas; à mesure qu'on s'éloigne du centre, la pression augmente. La rotation est accompagnée d'un mouvement de *translation*.

Pour les cyclones qui atteignent l'Europe occidentale, la translation a lieu du sud-ouest au nord-est (2). Dans la région D du cyclone

(1) Donnons, au vent qui souffle et à l'observateur A, une vitesse est-ouest égale et contraire à celle de l'observateur; celui-ci devient immobile *sans que les apparences changent.* Le courant d'air a gardé sa vitesse nord-sud Av et a acquis une vitesse est-ouest Av', *différence* entre la vitesse est-ouest égale et contraire à celle de l'observateur et sa vitesse propre est-ouest qui est plus petite. Sa direction apparente est Av_1 (fig. 355).

(2) Dans l'hémisphère nord, le centre d'un cyclone marche d'abord vers le nord-ouest à peu près jusqu'à la limite des alizés, puis il se dirige vers le nord-est, en suivant une courbe d'apparence parabolique. En un point A atteint par un cyclone, la pression atmosphérique est d'abord celle de l'isobare *a* (750 dans le cas actuel), puis de l'isobare *b* (740)

qui est à droite d'un observateur placé au centre et regardant dans le sens du transport du cyclone (fig. 356) la vitesse absolue du vent est la somme de la vitesse de rotation et de la vitesse de translation (*demi-cercle dangereux* des marins D); à gauche, en M, elle est la différence des deux vitesses (*demi-cercle maniable* M). Un navire atteint par un cyclone cherche à s'éloigner du centre pour sortir du cyclone, il sait que s'il fait face au vent, le centre est à sa droite. La règle est inverse dans l'hémisphère austral.

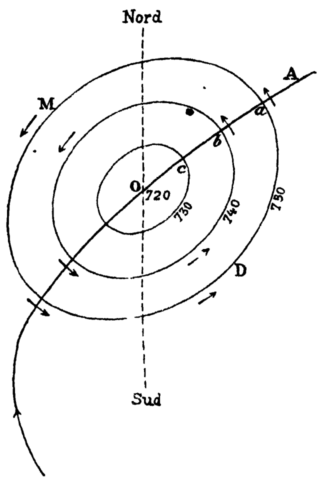


Fig. 356.

L'étude des courbes isobares montre l'existence de tourbillons plus vastes que les cyclones, offrant comme eux un centre où la pression atmosphérique est minimum; la vitesse de rotation et la vitesse de translation sont moindres que dans les cyclones. Dans l'Europe occidentale, ces mouvements de l'air appelés **bourrasques** viennent de l'océan Atlantique et se dirigent vers l'est. Leur passage est annoncé à l'avance par les déformations progressives des courbes isobares. La connaissance de la propagation régulière des bourrasques est la base la mieux établie de la prévision du temps.

CHAUFFAGE DES APPARTEMENTS

Les appareils qui servent au chauffage des appartements sont les *cheminées*, les *poêles* et les *calorifères*.

350. CHEMINÉES. — Les *cheminées sont des foyers ouverts surmontés d'un conduit* qui fait un appel d'air au niveau du foyer.

Tirage des cheminées. — En s'élevant dans la cheminée par sa diminution de densité, l'air chauffé produit un appel d'air froid ou *tirage* qui entretient la combustion.

Imaginons deux tuyaux verticaux de même hauteur AB et A'B' communiquant entre eux à la partie inférieure. Si AB est plus froid

puis de l'isobare *c* (730), puis du centre du cyclone (720) avec le calme; puis le vent saute de 180° et la pression remonte graduellement.

que A'B', une tranche *mn* du tube BB' éprouve des pressions inégales sur ses deux faces (fig. 357).

De B vers B', la pression est égale à la pression atmosphérique P, qui s'exerce au niveau AA', accrue de la pression de la colonne froide AB de hauteur *h* et de densité *d*. De B' vers B, la pression est égale à la pression P accrue de la pression de la colonne d'air chaud A'B', de hauteur *h* et de densité *d'* inférieure à *d*. L'excès de pression de B vers B' est *h* (*d* — *d'*); il augmente avec *h* et avec *d* — *d'*. Il y a mouvement vers BB' (descendant en AB et ascendant en B'A').

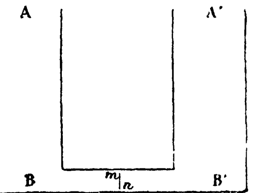


Fig. 357.

Dans le cas d'une *cheminée*, l'air froid s'échauffe en traversant le foyer en B'; l'air extérieur et l'air de la cheminée se comportent comme s'ils étaient placés dans deux tuyaux en communication. Les pressions sur une section verticale, située à l'entrée du conduit T (fig. 358), sont les mêmes que sur la tranche *mn* du canal de communication des deux tuyaux AB et A'B'. Il y a *tirage* par la partie inférieure de la cheminée.

Conditions qui accroissent le tirage. — Le tirage augmente avec la *hauteur* de la cheminée et avec la *température* de l'air de la cheminée. On augmente la hauteur de la cheminée en prolongeant le conduit de fumée par un tuyau en tôle. On élève la température dans le conduit, en abaissant le registre de la cheminée, ce qui réduit la section d'entrée du foyer et diminue la ventilation.

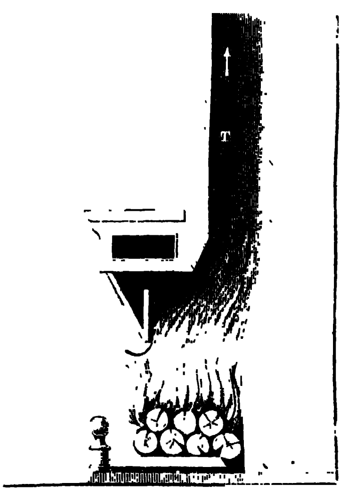


Fig. 358.

La direction de la cheminée doit être voisine de la verticale, car les frottements y sont moindres que dans un tuyau oblique.

Le courant ascendant de la cheminée amène sur le combustible une grande quantité d'air qui active le feu et entraîne au dehors les produits de la combustion; en outre, il assure, par appel d'air, la *ventilation* de l'enceinte que chauffe la cheminée.

Causes de tirage insuffisant. — Plusieurs causes peuvent ren-

dre le tirage insuffisant : 1° Une ***hauteur trop petite*** de la cheminée (1) ; 2° Une ***trop grande largeur*** qui permet des courants descendants d'air froid en même temps que des courants ascendants d'air chaud ; 3° Une température des gaz de la combustion peu supérieure à celle de l'air ambiant, comme cela peut avoir lieu dans des ***poêles à combustion lente;*** 4° Une ***rentrée insuffisante de l'air*** extérieur par les joints trop bien ajustés des portes et des fenêtres, ce qui produit dans la chambre une raréfaction de l'air et diminue la pression en *mn* dans le sens BB' ; 5° La présence dans une chambre voisine d'une ***cheminée d'un tirage plus actif,*** qui produit une aspiration jusque dans la chambre de la cheminée BB' ; 6° Le refoulement de l'air chaud de la colonne BB' par un ***vent violent.***

Les ***cheminées*** ne chauffent que par la chaleur qu'elles rayonnent, et celle-ci n'est qu'une petite fraction de la chaleur de combustion.

351. POÊLES. — Les ***poêles*** sont des *foyers fermés*, ils utilisent la plus grande partie de la chaleur produite, mais ils n'assurent que médiocrement la ventilation de la pièce chauffée et dessèchent l'air de la pièce. Lorsque le tirage est trop réduit, comme dans les poêles ***à combustion lente,*** non seulement la ventilation est insuffisante, mais, en outre, les gaz de la combustion, et particulièrement l'oxyde de carbone, peuvent se répandre dans l'appartement.

352. CALORIFÈRES. — Un *calorifère est un foyer de grandes dimensions établi pour chauffer tout un édifice.*

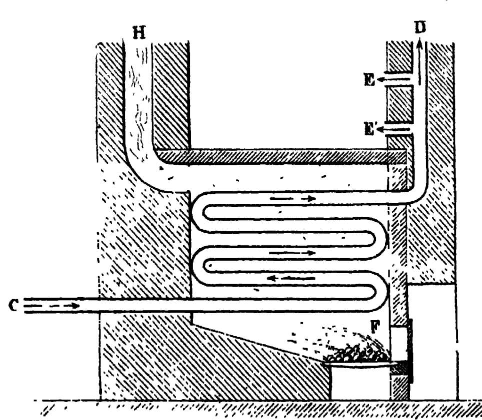


Fig. 359.

Dans le **calorifère à air chaud** (fig. 359), un foyer F est établi dans le sous-sol. Il chauffe la partie inférieure d'une conduite sinueuse CD qui aspire l'air *du dehors* en C et le répand sur son parcours dans les appartements par des orifices ou ***bouches de chaleur*** E et E'.

Un **calorifère à circulation d'eau chaude** (fig. 360) comprend : 1° Une ***chaudière tubulaire*** C, placée dans la cave de l'édifice et

(1) Avec une trop grande hauteur, les gaz supérieurs ne sont plus suffisamment chauds et n'ont plus de force ascensionnelle.

dans laquelle on chauffe l'eau; 2° Des *surfaces chauffantes* S, où l'eau circule et émet de la chaleur en se refroidissant; 3° Des *tuyaux de distribution*, qui conduisent l'eau de la chaudière aux surfaces chauffantes et la ramènent à la chaudière; 4° Un réservoir ou *vase d'évaporation* V, situé dans les combles et où se loge le produit de la dilatation. Ce réservoir évite des ruptures que causerait la dilatation de l'eau. La chaudière et le réservoir communiquent par deux tuyaux. L'un, *t'*, vertical, conduit l'eau chaude de la chaudière au réservoir; l'autre *t* ramène cette eau du réservoir à la chaudière en parcourant les enceintes à chauffer. Le système des conduites est plein d'eau.

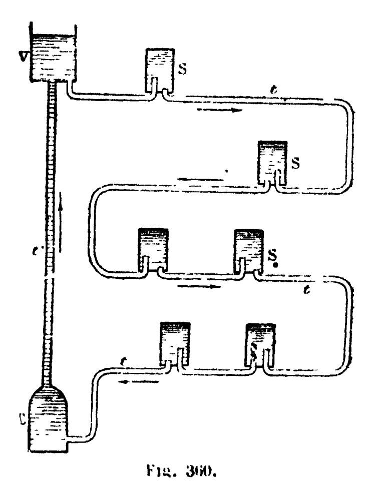


Fig. 360.

La vitesse de circulation *croît avec la différence de densité* des colonnes liquides ascendante et descendante.

Dans les **calorifères à vapeur d'eau**, une chaudière installée dans un sous-sol produit de la vapeur à 100°; cette vapeur se rend par des tuyaux aux différentes parties de l'édifice. Dans les pièces à chauffer, les tuyaux sont garnis d'ailettes A (fig. 361), qui offrent à l'air une large surface de contact et constituent des *radiateurs*. La vapeur s'y refroidit et dégage, en se condensant, une grande quantité de chaleur. La canalisation amène la vapeur par un tuyau V et, par un autre tuyau C, ramène l'eau condensée à la chaudière où elle est vaporisée de nouveau. Une vis *v* permet de régler, dans chaque pièce, l'introduction de la vapeur.

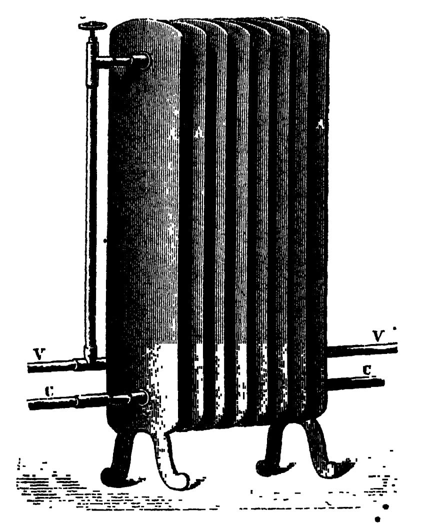


Fig. 361.

Les calorifères à eau chaude et à vapeur ne déterminent pas de ventilation.

ÉQUIVALENT MÉCANIQUE DE LA CALORIE

Relation entre la chaleur et l'énergie mécanique. — La chaleur résulte d'un état particulier de la matière et se présente comme une *énergie*, susceptible de transformations.

TRANSFORMATION DU TRAVAIL MÉCANIQUE EN CHALEUR

353. Toutes les actions mécaniques déterminent une production de chaleur, par une dépense de travail.

Percussion. — Le fer s'échauffe quand on le forge. De même, le choc d'un marteau sur un morceau de plomb produit assez de chaleur pour qu'une pile thermo-électrique, appliquée sur le plomb, accuse une notable élévation de température. Une balle de plomb, lancée par une arme à feu contre un mur résistant, peut s'échauffer au point d'entrer en fusion.

Frottement. — On connaît l'échauffement d'un bouton de cuivre vivement frotté sur une table, d'un outil qui travaille dans du bois ou du métal, d'un frein serré contre le cercle d'une roue de voiture. On carbonise le bois et, même on l'enflamme, en frottant deux morceaux de bois l'un contre l'autre. C'est en frottant le phosphore d'une allumette qu'on l'échauffe au point de l'enflammer. Deux morceaux de glace, frottés l'un contre l'autre dans une enceinte à 0°, entrent en fusion.

Soit encore un tube de laiton T, à moitié rempli d'un mélange d'alcool et d'éther, et fermé par un bouchon (fig. 362). On le fait tourner rapidement à l'aide d'une manivelle fixée sur une grande roue à gorge, qui transmet, par une corde, son mouvement à une petite poulie montée sur l'axe du tube. En serrant le tube, pendant sa rotation, entre deux plaques de bois réunies par une charnière M, on détermine un

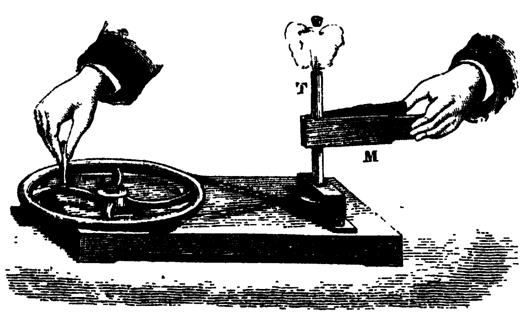


Fig. 362.

frottement qui produit une vive élévation de température; le liquide se vaporise et projette le bouchon.

Compression. — Dans un tube de verre épais, plein d'air, on pousse brusquement un piston qui le ferme (fig. 38) : l'air s'échauffe au point d'enflammer un morceau d'amadou placé à la partie inférieure du tube (*briquet à air*).

TRANSFORMATION DE LA CHALEUR EN TRAVAIL MÉCANIQUE

354. Dans une machine à vapeur, la vapeur se refroidit en poussant le piston: cette dépense de chaleur est la source du travail.

Un gaz comprimé, en s'échappant du vase qui le renferme, subit un refroidissement très marqué (marmite de Papin). La cause de ce refroidissement est le travail qu'il effectue, aux dépens de sa chaleur, en refoulant l'air extérieur. Le refroidissement d'un gaz par sa détente a été utilisé dans la liquéfaction des gaz.

PRINCIPE DE L'ÉQUIVALENCE

355. Dans les opérations où de la chaleur produit un travail, et dans celles où du travail produit de la chaleur, *un même nombre de calories* Q *correspond toujours à un même travail* T, quel que soit le mécanisme de la transformation. C'est l'énoncé de la *proportionnalité* entre une chaleur disparue et le travail effectué, ou entre un travail dépensé et la chaleur dégagée.

Équivalent mécanique de la calorie. — Une Calorie (Calorie du kilogramme) et 426 kilogrammètres se remplacent dans une transformation; 426 est l'*équivalent mécanique de la Calorie*. $0^{\text{kgmètre}}426$ est l'équivalent mécanique de la calorie du gramme. En ergs, l'équivalent mécanique de la calorie du gramme est $4{,}18.10^7$; en joules, 4,18. L'équivalent mécanique de la calorie est appelé, par abréviation : *Équivalent mécanique de la chaleur*. Le nombre 4,18 est représenté par la lettre J, le nombre 426 par E.

L'équivalent calorifique du kilogrammètre est $\frac{1}{426}$ (en Calories); en calories, l'équivalent calorifique de l'erg est $\frac{1}{4{,}18.10^7} = \frac{0{,}24}{10^7}$ et celui du joule 0,24 (1).

(1) Si l'on prenait pour unité de chaleur la quantité de chaleur qui correspond à l'unité de travail, l'équivalent mécanique de la calorie serait 1.

DÉTERMINATION DE L'ÉQUIVALENT MÉCANIQUE DE LA CALORIE

Deux méthodes peuvent être suivies : 1° chercher combien de calories on produit avec un travail connu; 2° déterminer combien de travail on retire d'une quantité de chaleur donnée.

356. Expérience de Joule. — Joule a appliqué la première méthode : *transformation en chaleur*, par l'intermédiaire d'un frottement, *du travail effectué par la chute d'un poids.*

Appareil (fig. 365). — Dans un calorimètre C, rempli d'eau, tourne un axe vertical I muni de palettes de laiton G, mobiles dans les espaces laissés libres par des cloisons verticales échancrées H

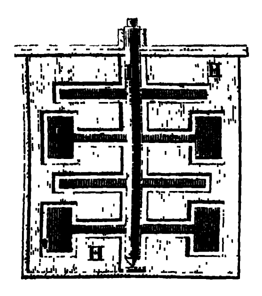


Fig. 363.

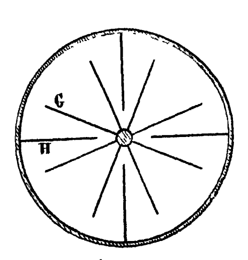


Fig. 364.

(fig. 363 et 364). La rotation de l'axe est produite par une chute de poids.

A cet effet, la partie supérieure *c* de l'axe de rotation se continue par un treuil T, fixé avec une goupille *a*. Sur ce treuil s'enroulent, en sens contraires, deux cordons dont les extrémités sont assujetties sur les circonférences de deux poulies A. Sur les axes *e* de ces poulies s'enroulent deux autres cordons portant deux masses de plomb P de même poids (fig. 365). La chute de ces masses, le long des règles divisées R, entraîne la rotation des poulies et, en même temps, du treuil et de l'axe qui porte les palettes. Quand les deux poids ont atteint le sol, on interrompt, en enlevant la goupille *a*, la liaison du treuil et de l'axe à palettes et, à l'aide de la manivelle M, on remonte les poids, sans mettre en mouvement les palettes. Pour obtenir un dégagement de chaleur mesurable avec précision, la chute des poids est répétée une vingtaine de fois. Un thermomètre très sensible *t*, plongé dans le calorimètre, fait connaître l'élévation de température.

Pendant la rotation de l'axe, le mouvement de chute des poids

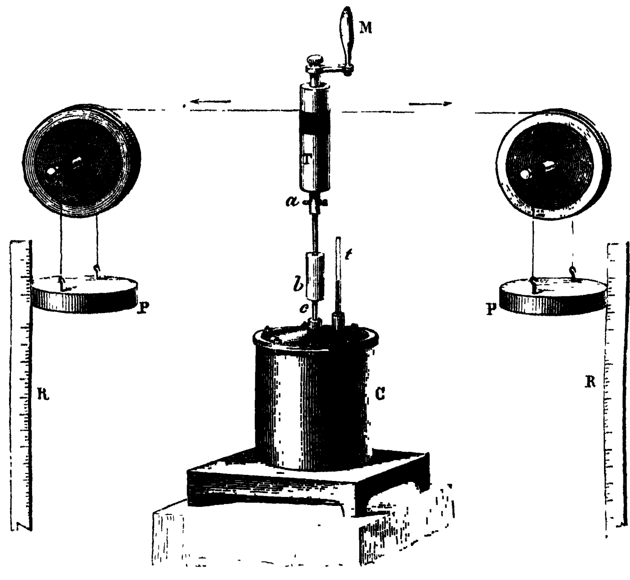


Fig. 365.

s'accélère, mais la résistance due au frottement des palettes croît avec leur vitesse et arrive rapidement à absorber tout le travail de la chute des poids. Dès lors, la vitesse de chute reste uniforme; la force vive du système entraîné ne varie plus; le travail moteur des poids est égal au travail résistant qui est le travail de frottement des palettes contre le liquide. Ce travail de frottement est intégralement converti en chaleur.

Appelons T la fraction du travail (en kilogrammètres) des poids qui est absorbée par le frottement dans le calorimètre, Q le gain de chaleur du calorimètre (en Calories); on trouve, pour l'équivalent mécanique E, en kilogrammètres :

$$E = \frac{T}{Q} = 426.$$

Travail absorbé par le frottement dans le calorimètre. — Pour une chute de hauteur H, le travail des poids 2MgH (2M en grammes, H et g en centimètres, travail en ergs) a produit trois effets :

1° Une partie principale T a été détruite par frottement dans le calorimètre et convertie en chaleur que l'on mesure; 2° Une partie a communiqué une force vive aux poids; 3° Une partie a entretenu des frottements accessoires (dans le mouvement du treuil, des poulies, des cordons, etc.) et communiqué certaines forces vives.

Force vive des poids. — La force vive des poids est annulée au moment de leur choc contre le sol; v désignant la vitesse des poids quand ils touchent le sol, cette force vive est $\frac{1}{2}\,2Mv^2 = Mv^2$.

La différence $2MgH - Mv^2$ représente : le travail T de frottement dans le calorimètre, le travail t des frottements accessoires et la force vive w du système (sauf les palettes et les poids). La force vive des palettes s'annule par le choc contre l'eau dans le calorimètre et est comprise dans le terme T, la force vive w du reste du système se perd dans les supports au moment de l'arrêt. On a ainsi :

$$2MgH - Mv^2 = T + t + w. \quad (1)$$

Calcul des travaux accessoires. — Pour évaluer $t + w$, Joule détachait la goupille a, abaissait l'axe à palettes et attachait les cordons au treuil de façon que, les poids se faisant équilibre comme dans la machine d'Atwood, l'un des poids fît monter l'autre, en descendant. On cherchait alors quelle masse m il fallait ajouter à l'un des poids pour que le système se mît en mouvement et eût la vitesse v au moment du choc contre le sol.

Dans cette expérience auxiliaire, où le treuil ne faisait pas tourner les palettes, le travail mgH du poids moteur m servait à vaincre les résistances accessoires et il communiquait aux masses $2M + m$ une force vive $\frac{2M + m}{2} v^2$ (qui s'annule par le choc).

On avait $mgH - \frac{2M + m}{2} v^2 = t + w$ (2)

En combinant (1) et (2) $(2M - m)\,gH + \frac{m}{2} v^2 = T$ (1).

Pour 20 chutes, on multiplie T par 20.

Chaleur gagnée par le calorimètre. — Appelons K la capacité calorifique du calorimètre et de tout ce qui s'échauffe; soient t et θ les températures initiale et finale; $K(\theta - t)$ est le gain de chaleur du calorimètre. On aura la *chaleur totale, due au frottement*, en y ajoutant la perte de chaleur par refroidissement pendant l'expérience.

Correction du refroidissement. — Les 20 chutes ont exigé 30 minutes. Les excès moyens de la température du calorimètre sur le milieu ambiant, sont notés pour chaque minute, $\tau_1, \tau_2 \ldots \tau_n$. La somme des abaissements de température correspondants du calorimètre sera, d'après la loi du refroidissement de Newton (**332**) : $A\tau_1 + A\tau_2 + \ldots + A\tau_n = A\Sigma\tau$

Pour déterminer A, on fait une expérience auxiliaire : les palettes étant au repos, on observe l'abaissement de température ε' pour 5 minutes et un excès moyen τ' du calorimètre sur le milieu ambiant ; $\varepsilon' = 5A\tau'$ donne A.

En définitive : $Q = K\,[\theta - t + A\Sigma\tau]$.

Résultat. $$\frac{20T}{Q} = \frac{20\left[(2M - m)\,gH + \frac{m}{2} v^2\right]}{K\,[\theta - t + A\Sigma\tau]},$$

$$\frac{20T}{Q} = 41\ 800\ 000 = 4{,}18.10^7.$$

(1) Mg et mg désignent les poids moteurs corrigés de la poussée de l'air.

Dans les calculs qui précèdent, T est évalué en *ergs* et Q en *calories*.

357. Expérience de Hirn. — Hirn a appliqué la deuxième méthode : la *transformation de la chaleur en travail.*

Principe de la méthode. — Dans une machine à vapeur, *la production de travail mécanique est accompagnée de la disparition d'une certaine quantité de chaleur; la vapeur se refroidit en poussant le piston.*

Une fraction de la chaleur, empruntée par la vapeur à la chaudière, gagne le condenseur ou l'atmosphère.

Opérant sur une machine industrielle, Hirn mesurait :

1° Le nombre Q de calories que possédait la masse de vapeur entrant dans le corps de pompe à chaque coup de piston, et le nombre de calories Q' que possédait cette vapeur à la sortie du corps de pompe; 2° le travail T effectué par la vapeur sur le piston.

On a toujours $Q > Q'$. La chaleur $Q - Q'$, que la vapeur a perdue et qui disparaît, est proportionnelle au travail T.

$$\frac{T}{Q - Q'} = E.$$

Calcul de Q — Q'. — *En régime normal*, la machine reprend périodiquement le même état dans toutes ses parties : à chaque période, la masse de vapeur M qui entre dans le corps de pompe (aller et retour du piston) est la masse d'eau M que la chaudière reçoit par la pompe d'alimentation. Cette eau, puisée dans le condenseur à t^0 et convertie dans la chaudière en vapeur saturante à T^0, absorbe la quantité de chaleur $Q = M(T - t + L_T)$; L_T chaleur de vaporisation du liquide à T^0.

La chaleur Q' *rendue au condenseur* se connaît par la masse N d'eau froide à 0^0, qu'il faut, à chaque période, faire entrer dans le condenseur pour y maintenir constante la température t; $Q' = N(t - \theta)$.

$Q - Q'$ a disparu par le travail de la vapeur sur le piston.

Calcul du travail T. — S étant la surface du piston, p la pression de la vapeur par unité de surface pour une position du piston, $Sp\delta$ est le travail effectué par la vapeur pour un petit déplacement δ du piston. Le travail total de la vapeur pour une période (aller et retour) est la somme des travaux correspondant aux positions successives du piston. Cette somme : $Sp\delta + Sp'\delta' + \ldots = S\Sigma p\delta$.
est fournie par l'Indicateur de Watt (**374**).

358. Invariabilité de l'équivalent mécanique de la calorie. — La proportionnalité entre la chaleur et le travail a été vérifiée dans des cas très divers.

Le coefficient de proportionnalité, $4,18.10^7$, ne varie pas. Ce *fait est indépendant de toute hypothèse sur la nature de la chaleur.*

En raison de ses transformations, la chaleur peut être considérée

comme ayant une capacité de travail ou *une énergie*. Par le principe de l'équivalence, l'énergie calorifique est équivalente à une énergie mécanique.

ANALYSE DES EFFETS DE LA CHALEUR SUR UN CORPS

359. La chaleur communiquée à un corps produit divers effets : 1° **Des effets extérieurs**, par la dilatation. Le déplacement de la pression atmosphérique exercée sur la surface correspond à un travail externe. Faible avec les solides et les liquides qui se dilatent peu, ce déplacement est considérable avec les gaz et les vapeurs. 2° **Des effets intérieurs**. Une portion de la chaleur accroît les intervalles qui séparent les molécules, en surmontant des *forces de cohésion*, parfois considérables (travaux de dilatation, de fusion, de vaporisation); une autre partie augmente les excursions des molécules en élevant la température.

Énergie interne d'un corps. — Lorsqu'une certaine quantité de chaleur a été cédée à un corps ou à un système de corps, outre un travail externe, elle réalise un travail positif interne et augmente l'énergie potentielle du système. Quand le système est ramené à son état primitif, un travail négatif, effectué dans le retour, reproduit la quantité de chaleur primitive.

360. Équation générale de l'équivalence. — Désignons par ΔU le travail interne effectué dans un système auquel on a appliqué une quantité de chaleur Q, par T le travail externe effectué en même temps ; la chaleur dépensée pour réaliser le travail interne est $\frac{\Delta U}{J}$, la chaleur équivalente au travail externe est $\frac{T}{J}$ et la chaleur totale est :

$$Q = \frac{\Delta U}{J} + \frac{T}{J}, \text{ (1)} \qquad \text{d'où } JQ = \Delta U + T.$$

On n'a l'égalité JQ = T que dans deux cas : 1° si ΔU est négligeable; 2° si le système est revenu à son état primitif, auquel cas ΔU est nul comme somme algébrique de deux termes égaux, l'un positif et l'autre négatif.

(1) Pour fixer les idées, considérons 1 kg. d'eau à 100° sous la pression atmosphérique et faisons passer cette eau à l'état de vapeur saturante, en lui fournissant 587 Calories. Cette chaleur effectue 1° un *travail externe*, la vapeur repoussant la pression atmosphérique; 2° un *travail interne* d'expansion moléculaire qui fait passer le volume de l'eau de 1 à 1650 litres.

Calcul du travail externe. — Si la vapeur se forme dans un cylindre de 1 mètre carré de section, l'atmosphère est repoussée sur une hauteur de $1^m,65$ et le travail de poussée sera 1,65.10330 kilogrammètres. La chaleur équivalente est environ 40 Calories.

Calcul du travail interne. — La différence entre 587 et 40 ou 497 Calories a été dépensée en travail interne : ΔU = 497.426 kilogrammètres. Les 497 calories ont été ainsi converties en énergie potentielle.

Conditions précises de l'équivalence. — Une mesure de l'équivalent mécanique de la calorie sera effectuée dans une opération où *un système n'échange avec le milieu extérieur que de la chaleur et du travail.* Elle ne sera obtenue correctement, par le quotient du *travail externe* effectué et de la *chaleur dépensée*, que si : le *travail interne a été négligeable*, ou si : le système, après avoir dépensé de la chaleur et réalisé un travail externe, *est revenu à son état initial* (mêmes positions, mêmes vitesses et mêmes températures).

Si l'on représente par un point figuratif l'état du système à ses étapes successives, le système doit décrire, dans la suite de ses transformations, une courbe fermée ou un *cycle fermé.*

Un système qui revient périodiquement à son *état initial* et accomplit un travail continu, comme une machine à vapeur, dépense une énergie calorifique et, pour un nombre entier de périodes, il y a *un rapport constant entre le travail externe effectué et la chaleur dépensée.* C'est ainsi que Hirn a mesuré l'équivalent mécanique de la calorie (**357**).

Dans la détermination de l'équivalent mécanique par le frottement de l'eau (**356**), l'eau du calorimètre s'échauffait très peu et le travail interne d'écartement des molécules était insignifiant.

361. Détente d'un gaz dans le vide. — Le travail *interne* est nul dans la détente d'un gaz parfait. Dans des gaz voisins de l'état parfait. tels que l'hydrogène, l'oxygène, l'azote, l'air, les particules sont assez écartées pour que leurs réactions mutuelles soient négligeables et il n'y a pas d'effort appréciable à exercer pour produire la *détente.* L'effet intérieur d'une addition de chaleur se réduit alors à une élévation de température. Ce résultat est conforme à des expériences de Gay-Lussac développees plus tard par Joule. Joule a placé dans un même calorimètre C, deux réservoirs métalliques (fig. 366) dont l'un A, était plein d'air comprimé à 22 atmosphères; l'autre B était vide; les deux réservoirs pouvaient communiquer par un robinet R. En ouvrant le robinet, on constatait que la température t de l'eau du calorimètre ne variait pas ; par conséquent, la masse d'air se détendait dans le vide sans variation de température [1].

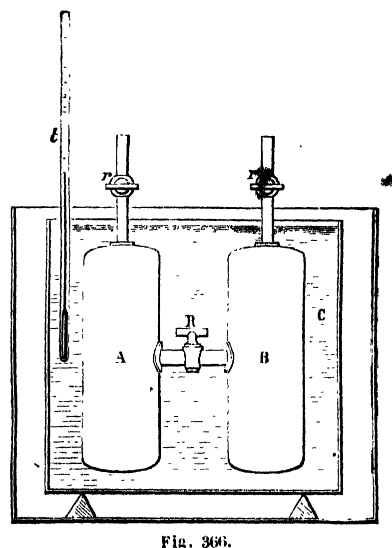


Fig. 366.

Détente d'un gaz dans l'air. — Si le gaz comprimé du vase A s'était

(1) La détente en vase clos sans variation de température n'appartient rigoureusement qu'aux gaz qui suivent exactement la loi de Mariotte. Même pour les gaz les plus voisins de l'état parfait, il y a un refroidissement *par détente* sans travail externe, mais il est négligeable si on le compare au refroidissement par détente avec travail externe.

échappé dans l'atmosphère, il aurait effectué un travail *extérieur* en refoulant l'air atmosphérique et sa détente aurait été accompagnée d'un refroidissement considérable. Ce refroidissement se constate en dirigeant le jet d'un gaz comprimé sur l'une des faces d'une pile thermo-électrique (1). De très grands froids sont produits par la détente des gaz liquéfiés.

Compression d'un gaz. — Inversement, quand on comprime un gaz, le travail extérieur qu'on exerce sur lui se convertit en chaleur. Un gaz que l'on comprime dans le briquet à air s'échauffe notablement (**54**).

Chaleurs spécifiques des gaz à volume constant et à pression constante. — On considère pour un gaz deux chaleurs spécifiques.

1° Si l'on chauffe de 1° une masse M d'un gaz dans une enceinte fermée, sans travail externe, il faut lui donner un nombre c de calories, appelé *chaleur spécifique à volume constant.*

Cette chaleur spécifique est déterminée par la relation : $q = Mct$; q est le nombre de calories nécessaires pour porter, de 0° à $t°$, M grammes de gaz à volume constant. Dans *un gaz parfait,* cette chaleur ne sert qu'à élever la température ou à augmenter la force vive moléculaire, elle ne dépend pas de l'écartement des molécules ou du volume du gaz.

2° Pour échauffer de 1° l'unité de masse d'un gaz à pression constante, c'est-à-dire en laissant le gaz se dilater librement, ou effectuer un travail externe de dilatation, il faut lui donner un nombre C de calories, dit *chaleur spécifique à pression constante.*

$Q = MCt$ est le nombre de calories nécessaires pour porter, de 0° à $t°$, M grammes du gaz en les maintenant sous une pression constante p.

La chaleur C est supérieure à la chaleur c, car elle élève la température et elle effectue, en outre, un travail externe de dilatation.

362. Calcul de l'équivalent mécanique par Mayer. — R. Mayer a utilisé la différence entre les deux chaleurs spécifiques de l'air pour calculer l'équivalent mécanique de la calorie.

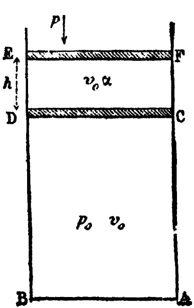


Fig. 367.

Principe de la méthode. — Concevons *un gramme d'air* à 0°, occupant un volume v_0 dans un vase cylindrique de section S (fig. 367) fermé par un piston sans poids, qui se déplace sans frottement. Si le piston est maintenu fixe, il faut c calories pour échauffer le gaz de 1°. Si le piston se déplace librement, le gaz refoule la pression atmosphérique et il faut C calories pour l'échauffer de 1°.

Mayer avait conclu des expériences de Gay-Lussac que la chaleur spécifique c est entièrement employée à élever la température du gaz de 1°; la différence $C - c$ représente donc la chaleur dépensée pour effectuer le travail externe de dilatation.

Travail externe de dilatation. — Soit p la pression exercée par l'atmosphère, par unité de surface; la pression sur la surface S du piston est

(1) Si l'on place une capsule pleine d'eau sous la cloche d'une machine pneumatique et si l'on fait le vide, on voit se produire un brouillard; la raréfaction de l'air est en effet accompagnée d'un refroidissement qui condense la vapeur d'eau de la cloche.

pS. Pour un déplacement h du piston, le travail de la dilatation sera :

$$pSh = p\Delta v = p\alpha v_0.$$

D'après l'équation $v_0 + \Delta v = v_0 (1 + \alpha)$, on a : $\Delta v = \alpha v_0$,

$$p = 76.13{,}6.981 \qquad \alpha = \frac{1}{273} \qquad v_0 = \frac{1}{0{,}001293}.$$

$$p\alpha v_0 = \frac{76.13{,}6.981.}{273.0.001293} \text{ en ergs.}$$

Chaleur dépensée. — $C = 0{,}237$; $c = 0{,}168$; $C - c = 0{,}069$ calorie.
Équivalent mécanique de la calorie (en ergs).

$$\frac{p\alpha v_0}{C - c} = \frac{76.13{,}6.981.}{273.0{,}001293.0{,}069} = 4{,}18.10^7.$$

363. Hypothèses sur la nature de la chaleur. — Si l'on rattache les phénomènes calorifiques à des mouvements moléculaires, la conversion du travail en chaleur apparaît comme une transformation de mouvement.

On *admet* que les particules d'un corps, séparées par des intervalles intermoléculaires, exécutent constamment des excursions très rapides autour de leurs positions d'équilibre. *L'amplitude de ces excursions croît avec la température du corps.* Ces mouvements particulaires échappent à notre vue à cause de leur extrême petitesse; mais, en se communiquant aux terminaisons nerveuses de la peau ou à un thermomètre, ils produisent une sensation de chaleur ou une élévation de température. On conçoit, dès lors, comment un travail mécanique est converti en chaleur; un *mouvement d'ensemble fait place à un mouvement particulaire.* Quand un forgeron laisse tomber son marteau sur une enclume, le mouvement du marteau est brusquement arrêté, mais sa force vive se distribue aux particules du fer forgé et de l'enclume dont elle accroît les excursions et élève la température. La chaleur dégagée augmente avec la masse du marteau et sa hauteur de chute, c'est-à-dire avec sa force vive. Il en est de même, dans le choc d'un projectile contre un obstacle.

MACHINES A VAPEUR

364. Une machine thermique est un *transformateur d'énergie* qui convertit régulièrement de la chaleur en travail mécanique. Dans une machine à vapeur, cette conversion se fait par *l'intermédiaire* de la force élastique d'une vapeur.

Première machine à vapeur. — La première machine à

vapeur, due à *Denis Papin,* consistait en un cylindre creux ou *corps de pompe,* ouvert par le haut, dans lequel se déplaçait un *piston* de même section armé d'une tige. Le piston était l'organe actif du mécanisme moteur. Le cylindre, contenant un peu d'eau à sa partie inférieure, était placé sur un foyer. La force élastique de la vapeur formée en chauffant l'eau poussait le piston jusqu'au haut du cylindre. Le feu était retiré; la vapeur se condensant par le refroidissement et ne gardant qu'une faible force élastique, la pression atmosphérique faisait redescendre le piston. En approchant le feu pour vaporiser l'eau, puis en l'éloignant, on obtenait un va-et-vient du piston.

La production de la vapeur, son expansion comme force motrice et sa condensation s'effectuaient dans le corps de pompe.

Chaudière, corps de pompe et condenseur distincts. — On évite la perte de chaleur qui résulte du refroidissement des parois du corps de pompe, et on augmente la rapidité du mouvement de va-et-vient par l'emploi d'un *générateur de vapeur* ou chaudière et d'un *condenseur,* distincts du corps de pompe.

CHAUDIÈRE A VAPEUR

365. Chaudière à bouilleurs. — Le générateur principal est un long cylindre G, en tôle de fer ou en cuivre, arrondi à ses extrémités. Au-dessous de lui, et communiquant avec lui par de larges tubulures, sont disposés côte à côte deux cylindres B de même longueur et de plus petit diamètre appelés *bouilleurs* (fig. 368 et 369). Les bouilleurs sont plongés directement dans le foyer. La vapeur s'y forme d'abord et elle se condense dans l'eau du cylindre principal qu'elle échauffe rapidement. La surface de chauffe s'accroît en augmentant le nombre des bouilleurs. Pour mieux utiliser les produits de la combustion, on les fait circuler dans des conduits de brique C qui entourent les parois de la chaudière, avant de les laisser passer à la cheminée K.

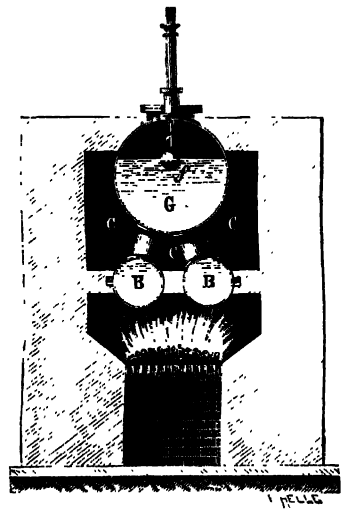


Fig. 368.

Dans les *chaudières tubulaires* la flamme et les gaz chauds du

foyer parcourent de nombreux tubes qui traversent la chaudière, et sont entourés par l'eau à vaporiser. Chauffée sur une vaste surface, l'eau fournit rapidement une grande quantité de vapeur.

Accessoires de la chaudière. — Des accessoires servent à prévenir les explosions et à assurer l'alimentation d'eau.

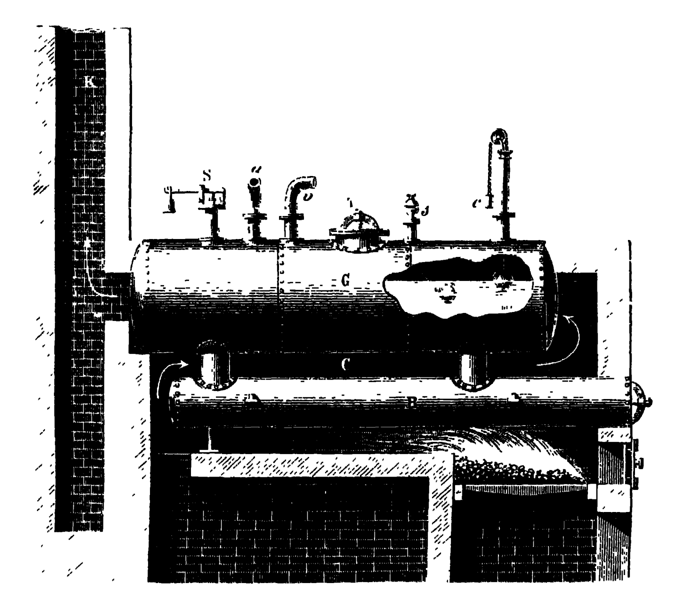


Fig. 369.

c contre-poids du flotteur, *s* sifflet d'alarme, T trou d'homme (pour les nettoyages et les réparations), *v* tube qui conduit la vapeur au cylindre, *a* tube qui amène l'eau d'alimentation, S soupape de sûreté.

Indicateur de la pression. — Une cause d'explosion est une pression trop forte de la vapeur. Un *manomètre métallique* marque constamment la pression. Une *soupape de sûreté* (fig. 370), s'ouvre quand la pression atteint la valeur qu'elle ne doit pas dépasser et permet à une partie de la vapeur de s'échapper.

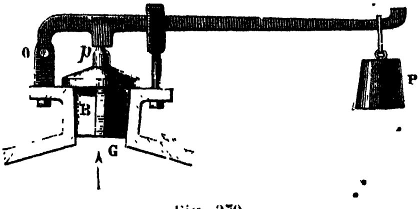


Fig. 370.

Indicateur du niveau de l'eau. — Une cause d'explosion est un niveau trop bas de l'eau, car les parois de la chaudière, laissées à découvert, rougiraient, et il y aurait une production presque instantanée d'une grande quantité de vapeur, au moment d'une nou-

velle introduction d'eau. On se met en garde contre ce danger par le *tube indicateur de niveau et le sifflet d'alarme.*

Tube indicateur de niveau : tube en cristal qui s'ajuste dans deux tubulures métalliques partant l'une du bas, l'autre du haut de la chaudière; l'eau prend le même niveau dans le tube et dans la chaudière.

Sifflet d'alarme : un flotteur ferme le pied du sifflet, tant que le niveau de l'eau n'est pas descendu au-dessous d'une certaine limite. Si le flotteur continue à descendre, la vapeur passe dans le sifflet et le fait vibrer.

Appareils d'alimentation. — L'alimentation de la chaudière se fait avec une pompe que la machine met elle-même en mouvement.

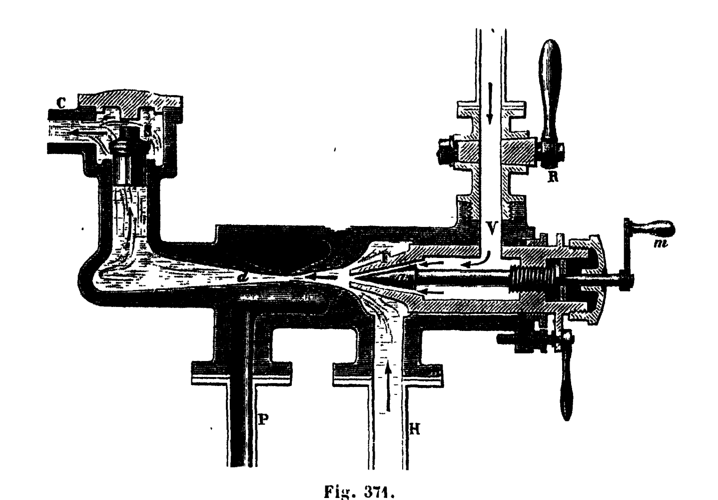


Fig. 371.

On évite la dépense de force qu'exige cette pompe par l'emploi de l'*injecteur automatique Giffard* (1) (fig. 371). Dans les locomotives, l'injecteur Giffard aspire l'eau qui est en réserve dans le tender.

CONDENSEUR

366. Le condenseur est un récipient hermétiquement clos, vide d'air, où de l'eau froide arrive constamment et maintient une température basse. D'après le *principe de la paroi froide,* si un corps de pompe rempli de vapeur est mis en communication avec une enceinte froide, la vapeur s'y précipite et s'y condense.

(1) L'injecteur Giffard se comporte comme une *trompe à vapeur* (**82**). L'eau aspirée soulève un clapet S et est amenée par un tuyau jusqu'au fond de la chaudière. L'air entraîné se dégage dans la chambre *c* qui entoure les deux ajutages, enfin l'eau qui s'écarte de la veine est ramenée par un tuyau P au réservoir d'aspiration.

On utilise une partie de la chaleur dégagée par la condensation, en puisant dans le condenseur l'eau d'*alimentation* de la chaudière.

MÉCANISME MOTEUR

367. Supposons un robinet R faisant communiquer le corps de pompe C avec la chaudière et un robinet R′ permettant sa communication avec le condenseur (fig. 372).

1° **R ouvert, et R′ fermé.** La vapeur soulève le piston P.

2° **R fermé et R′ ouvert.** La vapeur se précipite dans le condenseur et n'a plus, après un temps très court, que la force élastique correspondant à la température basse du condenseur; la pression atmosphérique refoule alors le piston.

R *ouvert* et R′ *fermé*. La vapeur de la chaudière soulève de nouveau le piston, etc. Dans cette **machine à simple effet,** la vapeur agit constamment sur la même face du piston et la pression atmosphérique fait descendre le piston.

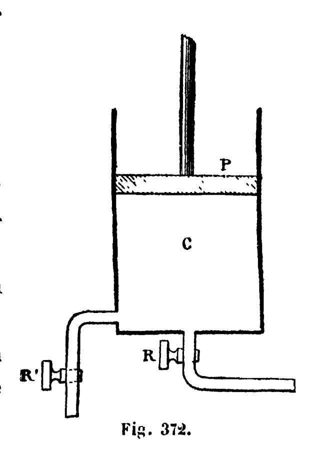


Fig. 372.

Dans les **machines à double effet**, un corps de pompe *ouvert* est remplacé par un corps de pompe *fermé aux deux bouts,* où se meut, d'un mouvement alternatif, un piston sur les deux faces duquel agit *successivement* la vapeur.

368. Corps de pompe (fig. 373). — Par un tube A, la vapeur se rend de la chaudière dans un corps de pompe cylindrique où se meut un piston tourné au diamètre du cylindre. La tige du piston traverse le fond supérieur, en glissant dans une boîte à étoupes, qui empêche les fuites de vapeur.

La marche de la machine est assurée par un appareil de distribution, des organes de transmission et des organes de régulation.

Distribution de la vapeur. — La distribution de la vapeur a lieu d'une *façon automatique*.

La vapeur, venant de la chaudière par un tube A, pénètre librement dans une *chambre de distribution,* fixée sur le côté du corps de pompe. Sur une des faces de cette chambre s'ouvrent trois canaux. Deux, *a* et *b,* conduisent aux extrémités supérieure et inférieure du corps de pompe. Un canal moyen *o* mène au condenseur. Le long

de la même face de la chambre glisse, d'un mouvement alternatif, une capacité semblable à un **tiroir,** guidée par une tige t et recouvrant toujours deux ouvertures à la fois (fig. 373).

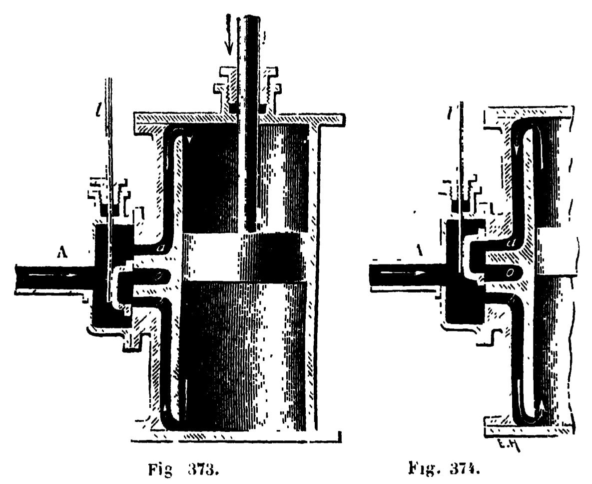


Fig. 373. Fig. 374.

Fonctionnement du tiroir. — Dans la figure 373, le tiroir est au bas de sa course, la vapeur de la chaudière se rend, par le canal a, sur la face supérieure du piston; en même temps, la vapeur située au-dessous du piston est refoulée par le canal b dans la cavité du tiroir, et, de là, par le canal moyen o, passe au condenseur.

Dans la figure 374, le tiroir a dégagé le canal b qui reçoit de la

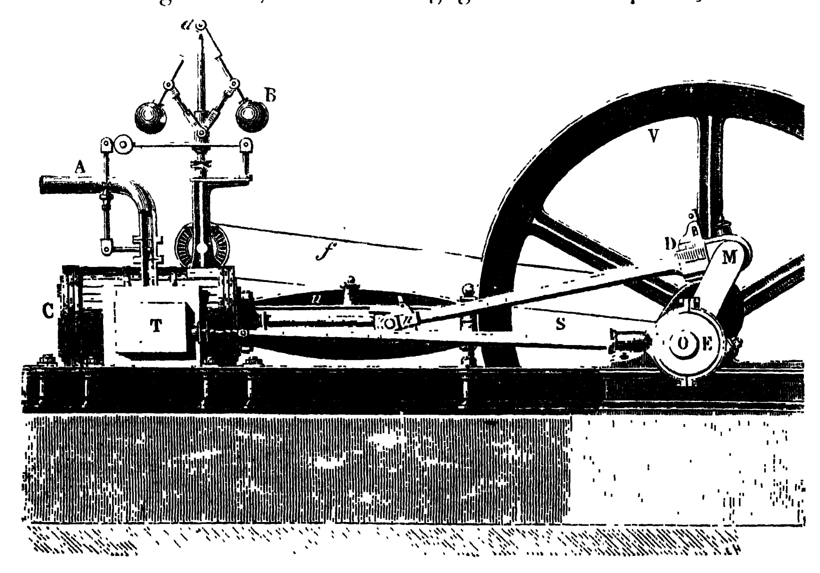


Fig. 375.

O axe de l'arbre de couche, M manivelle, D bielle, n articulation de la bielle et de la tige du piston, C corps de pompe, E excentrique, S bielle de l'excentrique, T tiroir, V volant, B régulateur à boules, A tuyau d'admission de la vapeur.

vapeur et le piston remonte; au même moment, par le canal *a* et la cavité *o* du tiroir, l'accès du condenseur est ouvert à la vapeur qui surmonte le piston.

369. Organes de transmission. — Transformation du mouvement alternatif du piston en mouvement de rotation continu. — Dans les machines à connexion directe (fig. 375), l'extrémité de la tige du piston, maintenue entre deux glissières *u*, parallèles à l'axe du cylindre, est articulée à une longue barre D appelée **bielle;** la bielle est articulée à l'extrémité d'une **manivelle** M.

La manivelle, perpendiculaire à un axe en acier O, horizontal, appelé *arbre de couche*, lui est invariablement fixée et en détermine le mouvement. Le mouvement alternatif de la bielle imprime un mouvement de rotation continu à la manivelle.

L'arbre fait un tour complet pour une allée et venue du piston. L'arbre porte une roue très lourde, appelée *volant*, et une poulie sur laquelle passe une courroie sans fin, qui transmet le mouvement aux machines-outils.

Excentrique. — Le tiroir reçoit son mouvement alternatif d'un excentrique fixé sur l'arbre moteur et agissant sur la tige du tiroir. L'excentrique est un disque circulaire E (fig. 376), *solidaire* de l'arbre moteur, mais dont l'axe O′ *ne coïncide pas* avec l'axe O de l'arbre; il lui est parallèle. Ce disque est entouré par un collier de bronze G, dans lequel il peut tourner en glissant, et qui fait corps avec une bielle S articulée en J à la tige du tiroir. Le disque E, en tournant autour de l'arbre, devrait entraîner le collier, mais celui-ci glisse sur le disque et se trouve porté tantôt un peu en avant, tantôt un peu en arrière[1].

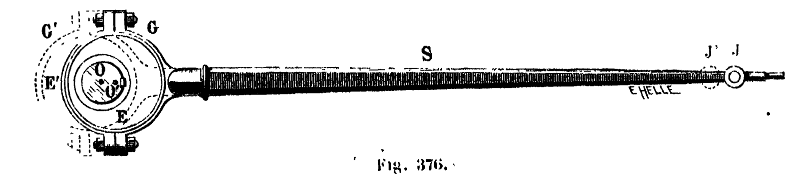


Fig. 376.

Le collier passant de G en G′, l'extrémité de la tige du tiroir va de J en J′. Le tiroir est ainsi déplacé, soit dans un sens, soit dans l'autre, à chaque demi-révolution de l'axe qui correspond soit à une allée, soit à une venue du piston.

(1) La bielle de l'excentrique prend le même mouvement que si elle était articulée à l'extrémité d'une manivelle ayant pour rayon la distance OO′ de l'axe de l'arbre de couche et de l'axe de l'excentrique. Un excentrique convient mieux qu'une manivelle pour le petit déplacement de la tige du tiroir.

370. Organes de régulation. — Volant. — Généralement, les travaux résistants ne sont pas continus et la vitesse des pièces d'une machine ne reste pas constante. Pour éviter des chocs qui fatigueraient les organes, on ajuste sur l'arbre de rotation un volant V à *circonférence très lourde.* Par l'énergie qu'il emmagasine, le volant régularise la marche pour des variations de courte durée, du travail moteur, ou du travail résistant (**38**).

Quand le travail moteur est supérieur au travail résistant, quelques outils n'ayant pas encore commencé à fonctionner, le volant tourne plus vite et gagne de la force vive.

Quand le travail moteur est égal au travail résistant, la vitesse de la machine et celle du volant restent constantes.

Si, par un surcroît passager de travail, *le travail moteur devient inférieur au travail résistant,* les organes de la machine et, en particulier le volant, cèdent une partie de leur force vive, la vitesse de la machine diminue, mais la diminution de vitesse est atténuée parce qu'elle se répartit sur une masse considérable (1).

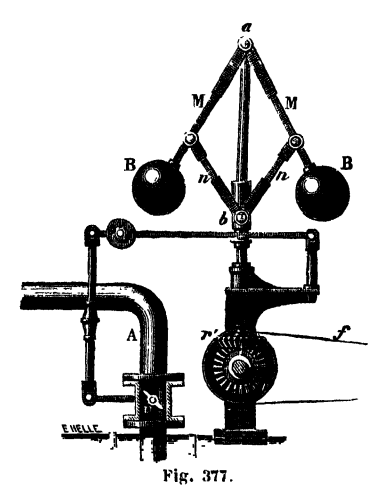


Fig. 377.

Aux extrémités de la course du piston, la bielle et la manivelle étant en ligne droite, la bielle est à ce moment sans action sur la manivelle (*point mort*), le volant intervient encore par sa vitesse acquise pour entraîner les organes et dépasser le point mort.

Régulateur à boules (fig. 377). — Le volant ne suffisant pas pour régulariser le mouvement si les variations sont de longue durée ou toujours de même sens, *l'admission* de la vapeur dans le corps de pompe est réglée *automatiquement* au moyen d'un régulateur à boules. C'est un système de deux boules pesantes B, fixées à deux tiges métalliques M, articulées en un point *a* d'un axe vertical. Cet axe et, avec lui, le système des boules, reçoit le mouvement de l'arbre de couche par un cordon *f* et deux roues d'angle *r* et *r'*. Quand l'arbre vient à *tourner plus vite,*

(1) Soit ω la vitesse angulaire du volant à un instant donné, sa force vive est $\omega^2\Sigma mr^2$ ou $\frac{1}{2}\omega^2 MR^2$ en le supposant réduit à sa circonférence massive.

et en même temps l'axe du régulateur, les boules *s'écartent* (un corps s'éloigne en effet d'autant plus de son axe de rotation que sa vitesse est plus grande [1]). Le mouvement vertical des boules est transmis par deux tringles *n* à une bague mobile *b*, qui monte en glissant le long de l'axe du régulateur et entraîne la fermeture partielle d'une valve *v*, placée dans le tuyau A d'admission de la vapeur.

DÉTENTE

371. Si la communication du corps de pompe avec la chaudière subsistait pendant la course entière du piston, la vapeur du corps de pompe aurait à la fin, comme au début, sa force élastique à T. En pénétrant dans le condenseur à t°, la vapeur perdrait *immédiatement* toute la différence des forces élastiques de T à *t*.

Mais, si le canal d'admission n'est ouvert que *pendant une fraction de la course* du piston, la vapeur du corps de pompe, isolée dès lors de la chaudière, se détend et continue à pousser le piston, pendant le reste de la course du piston.

Gain de travail par la détente. — Supposons la communication de la chaudière avec le corps de pompe interceptée au milieu de la course ascendante ou descendante du piston, le travail fourni pendant la première moitié du trajet L est $\frac{1}{2}$ SL $(p - p')$, S surface de base du piston, $p - p'$ différence des pressions de la vapeur sur

---

Si, pendant une minute, le travail moteur dépasse le travail résistant de T_1, ce travail est emmagasiné dans les pièces entraînées par l'arbre, dont le volant est la principale, et leur vitesse angulaire croît de ω à ω_1. La force vive du volant croît ainsi de

$$(\omega_1{}^2 - \omega^2)\frac{MR^2}{2} = T'_1, \quad T'_1 \text{ voisin de } T_1\,;$$

$\omega_1{}^2 - \omega^2$ est d'autant plus petit que MR^2 est plus grand. La variation de vitesse des organes de la machine sera atténuée si M, et surtout R, ont une grandeur suffisante.

(1) La boule B (fig. 378), de masse *m*, est soumise à deux forces : son poids BP $= mg$ et la traction BM de la tige ; ces deux forces ont une résultante qui est la force centripète BK, dirigée suivant le rayon BC de la circonférence qui a son centre O sur l'axe (**11**) :

$$\text{BK} = \text{BP}\ tg\ \theta = mg.\sin\theta,$$
$$\text{BK} = m\omega^2\ \text{BC} = m\omega^2\ \text{B}a\ \sin\theta,$$
$$\text{donc } m\omega^2\ \text{B}a \sin\theta = mg\sin\theta$$
$$\text{et } \cos\theta = \frac{g}{\omega^2 \text{B}a}.$$

l'angle d'inclinaison θ augmente avec la vitesse de rotation ω de l'axe et, par conséquent de l'arbre de couche.

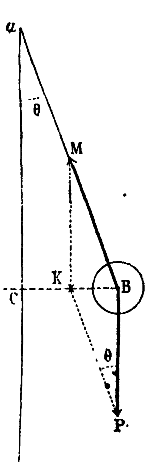


Fig. 378.

les deux faces. Pendant la seconde moitié du trajet, le volume de la vapeur *isolée* augmente. Lorsque la vapeur occupe tout le cylindre, sa pression est réduite à $\frac{p}{2}$. Le travail, pendant la seconde moitié de la course, est compris entre $\frac{1}{2}$ SL $(p - p')$ et $\frac{1}{2}$ SL $\left(\frac{p}{2} - p'\right)$.

A chaque coup de piston, le travail utilisable est plus petit que si la vapeur agissait à pleine pression pendant la course entière; mais, *sans dépense de vapeur* (et par conséquent de combustible), *on gagne tout le travail effectué pendant la détente.* On évite, en outre, des chocs qui auraient lieu à la fin de la course du piston si sa vitesse ne diminuait pas.

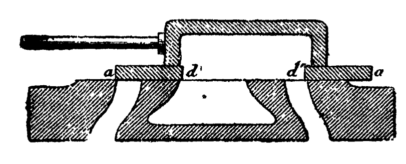


Fig. 379.

La détente est réglée par le tiroir, dont un prolongement en saillie *ad* et *a'd'* (fig. 379), appelé *recouvrement*, isole la chaudière du piston quand celui-ci a parcouru une partie de sa course.

DIVERS TYPES DE MACHINES A VAPEUR

372. S étant la section des faces du piston, p la pression de la vapeur par centimètre carré sur l'une des faces, p' la pression sur l'autre face, la force qui déplace le piston est S $(p - p')$.

Les diverses machines diffèrent par la valeur de p'.

1° Machines à **haute pression**, où p dépasse cinq atmosphères : il n'y a pas de condenseur, la vapeur se perd dans l'atmosphère; $p' = 1$ atmosphère. Les locomotives fonctionnent *sans condenseur.*

2° Machines à **basse pression.** Si la face du piston opposée à celle où agit la vapeur supporte la pression atmosphérique p', on n'utilise qu'une partie de la pression de la vapeur. Avec une pression de trois atmosphères dans la chaudière, la force $p - p'$ qui déplace le piston, n'est que de deux atmosphères. Il est alors avantageux de *condenser* la vapeur dans un condenseur où la pression p' est inférieure à la pression atmosphérique (1).

(1) Soit S $= 2000$ cm.^{2} et $p = 3$ atm.; pS $= 3.1033.2000$ grammes.
Si la température du condenseur est 45°, $p' = 0^{atm},1$; p'S $= 103,3 \cdot 2000$.
S $(p - p') = 2000\ [3.1033 - 103,3]$ grammes
ou $2000 \cdot 981\ [3.1033 - 103,3]$ dynes.
Pour un déplacement de L centimètres du piston à pleine pression, et une pression S $(p - p')$ dynes, le travail moteur est SL $(p - p')$ ergs.

La pression étant faible dans une machine à basse pression, on augmente la puissance de la machine en augmentant la *surface* du piston. Les dimensions des autres organes croissent en même temps, ce qui rend ces machines encombrantes. En outre, une source d'eau froide est nécessaire pour refroidir le condenseur; enfin, il faut extraire avec des pompes l'excès d'eau du condenseur et les gaz qui se dégagent de l'eau devenue chaude.

PUISSANCE

373. La puissance d'une machine est *le travail qu'elle fournit en une seconde*. L'unité *industrielle* de puissance est le **cheval-vapeur** : 75 kilogrammètres par seconde. Le **watt** est la puissance d'un moteur produisant un joule par seconde.

Un kilogrammètre vaut à Paris $9{,}81.10^7$ ergs ou près de 10 joules. Un cheval-vapeur vaut 736 watts.

Le travail A fourni par un piston dans sa double course, c'est-à-dire pour un tour de l'arbre de couche, est mesuré par l'*indicateur de Watt :* c'est le *travail indiqué*. Si l'arbre de couche fait m tours par seconde, la puissance indiquée sera mA. Le *travail effectif* $\mathfrak{T}$ par tour, mesuré au *frein*, donne le travail utilisable sur l'arbre, il est inférieur à A; la puissance effective est $m\mathfrak{T}$.

On construit des machines industrielles de puissances effectives très variables, depuis $\frac{1}{10}$ de cheval jusqu'à 20000 chevaux.

374. Mesure du travail A. — **L'indicateur de Watt** est un manomètre métallique enregistreur qui inscrit le travail effectué par la vapeur sur le piston.

Description (fig. 380). — Il consiste en un petit cylindre creux C, vissé sur l'une des bases du corps de pompe d'une machine à vapeur. Dans ce cylindre, se meut un piston P au-dessous duquel agit constamment la vapeur introduite par un robinet R. La tige de ce piston est entourée d'un ressort en hélice h, fixé d'une part au piston et de l'autre à la partie supérieure du cylindre. La dé-

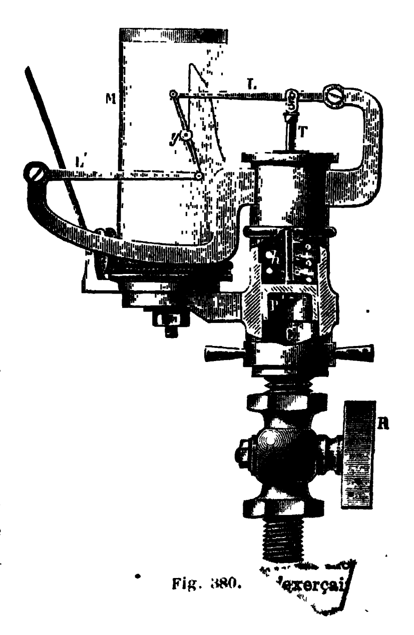


Fig. 380.

formation du ressort fait équilibre à la pression de la vapeur; le piston s'abaisse si la pression diminue, il s'élève si elle augmente; ses déplacements sont proportionnels aux variations de la pression dans le corps de pompe de la machine.

La pointe d'un crayon y, qui se déplace avec la tige T du piston, appuie sur une feuille de papier animée du mouvement alternatif de la machine (1).

Courbe de fonctionnement. — 1° Au début, la vapeur saturante de la chaudière, à la température t et à la pression p, pénètre dans le corps de pompe; la pression reste constante et la pointe du crayon décrit une droite AB horizontale (fig. 381).

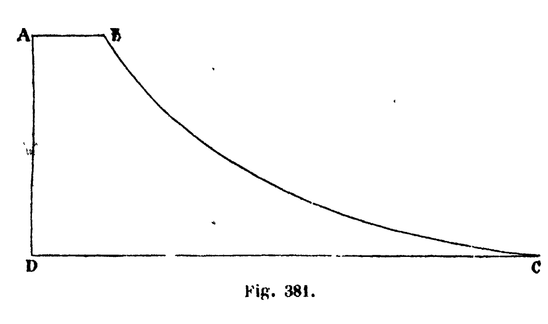


Fig. 381.

2° Le piston moteur ayant parcouru une fraction de sa course, la communication du corps de pompe avec la chaudière est interceptée, la vapeur se détend, sa pression s'abaisse, la courbe décrite par le crayon descend à partir de B. Elle atteint un point C, pour une pression p', qui correspond à la température t' du condenseur.

3° Quand le corps de pompe est mis en communication avec le condenseur, le piston revient en sens inverse, la vapeur est expulsée dans le condenseur sous la pression constante p'. Le crayon décrit une droite CD horizontale.

4° Le piston moteur étant revenu à son point de départ, la communication du corps de pompe avec le condenseur est supprimée et la communication avec la chaudière rétablie, la pression remonte brusquement à sa valeur initiale, le crayon trace la verticale DA. Dans les mouvements suivants du piston moteur, le crayon repasse sur la même courbe.

Un point de la courbe fait connaître la *position du piston* moteur et *la pression de la vapeur* qui agit à ce moment sur une de ses faces.

La courbe décrite par le crayon pendant la détente va de B en C'. Au moment de la communication avec le condenseur (2), il y a chute brusque de C' en C, la pression tombant de p'_1 à p' ($p'_1 = C'c$, $p' = cC$). Enfin, parcours horizontal de C en D (fig. 382).

---

(1) En pratique, la feuille de papier sur laquelle appuie le crayon n'est pas plane, mais enroulée sur un manchon M dont l'axe est parallèle à la tige T du petit piston. Par l'intermédiaire de cordes et de poulies, le mouvement alternatif du piston de la machine se communique au manchon, qui tourne autour de son axe d'angles proportionnels aux déplacements linéaires du piston de la machine pendant l'allée ou le retour.

Le crayon n'est pas ajusté directement sur la tige T du petit piston; les mouvements de cette tige, proportionnels aux pressions de la vapeur, sont transmis au crayon par une combinaison de leviers L et L' mobiles autour de points fixes O et O'; le crayon y garde un mouvement parallèle à la tige et aux génératrices du manchon.

(2) Pour ne pas exagérer la longueur du corps de pompe, on ne laisse pas la détente p') jusqu'à la valeur p' de la pression dans le condenseur.

Représentation du travail. — Pendant l'inscription du cycle fermé ABC'CDA, la vapeur a été motrice pour l'allée ABC', avec travail positif. De A en B, sous la pression p de la vapeur, le piston a effectué le travail $Sp.ab$ ou $p.ab$ (au facteur S près, qui est la surface du piston).

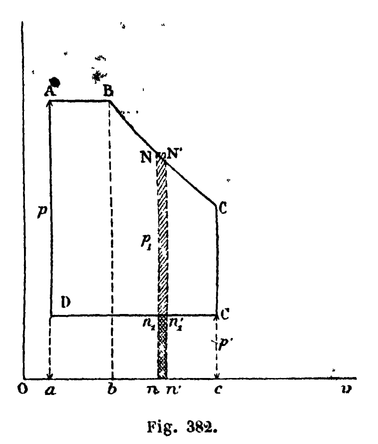


Fig. 382.

Pour obtenir le travail de la vapeur pendant la détente, considérons un déplacement très petit nn', le travail correspondant est la surface p_1nn' d'un petit rectangle; le travail total est une somme de petits rectangles ou la surface du trapèze curviligne $BC'cb$. Pour le retour CD, la vapeur expulsée est résistante, son travail est négatif et égal à la surface $CcaD$.

Le travail développé par le piston pendant sa double course (pour un tour de manivelle), est positif; il est représenté par la surface entourée par le cycle (différence des deux surfaces $ABC'ca$ et $CDac$)(1)

Le travail réel est l'aire d'une surface dont les angles sont arrondis (fig. 383) (2). Le tracé de la courbe est précieux pour le contrôle de la marche de la machine, car les irrégularités de la courbe accusent des imperfections de distribution (3).

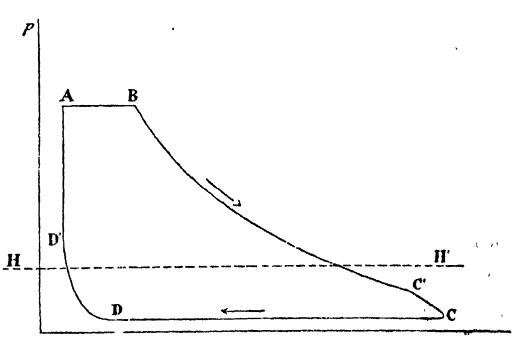


Fig. 383.

On obtient l'aire de la surface en développant le papier sur une feuille

(1) Un centimètre, sur une ordonnée, correspond à une pression de p dynes par centimètre carré; un centimètre, en abscisse, correspond à une course du piston de l centimètres. On connaît p et l. Le travail s'évalue en ergs, d'après l'échelle du tracé.

(2) Le tiroir s'entrouvre avant que le piston ait achevé sa course de droite à gauche et l'admission commence en D en légère avance; l'orifice d'admission étant d'abord peu ouvert, la pression monte lentement; lorsque le tiroir est largement ouvert, la pression prend la valeur p de la chaudière et la conserve jusqu'au point B.

Quand la détente commence, l'admission se ferme et la pression de la vapeur baisse de B en C'. La communication avec le condenseur s'établit, avant que le piston ait terminé sa course vers la droite, la pression s'abaisse à p' par la courbe C'C; la condensation continue dans la course rétrograde jusqu'à ce que la communication avec le condenseur soit couverte.

Enfin, la vapeur de la chaudière entre de nouveau et la pression monte de p' à p.

(3) Avant de visser l'indicateur, on a laissé le crayon tracer sur le papier en mouvement une droite horizontale HH' figurant la pression atmosphérique qui s'exerçait au-dessous du petit piston de l'indicateur.

métallique d'épaisseur uniforme que l'on découpe suivant le contour de la courbe et que l'on pèse.

375. Mesure du travail $\mathfrak{T}$. — Pour évaluer le travail transmis à des outils par l'arbre de couche, on isole l'arbre des pièces qui utilisent le travail et on absorbe ce travail par un frein qui frotte sur l'arbre.

Le frein de Prony (fig. 384) est une barre de bois qui porte, à l'une de ses extrémités, un collier EE que l'on serre sur l'arbre A avec des boulons b;

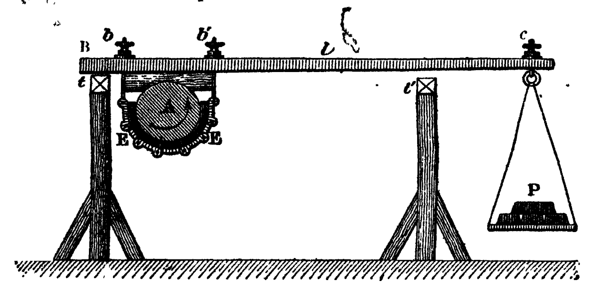


Fig. 384.

et, à l'autre extrémité, un plateau dans lequel on met des poids.

L'arbre tournant dans le sens de la flèche, son adhérence avec les mâchoires du collier entraîne le système dans le même sens; mais l'extrémité B vient appuyer contre le taquet t et l'arbre est obligé de frotter dans le collier; les poids P que l'on met dans le plateau entraînent le système en sens contraire; ce mouvement est limité par le taquet t'. On règle par tâtonnements la charge du plateau et le serrage des boulons pour que le levier se tienne horizontal, alors que l'arbre a sa vitesse de fonctionnement normal (1) (n tours par seconde).

Le frottement de l'arbre de couche sur le frein agit, pour soulever la barre, comme une force verticale F, tangente à l'arbre, à l'extrémité de son rayon ρ. Une autre force verticale tend à abaisser la barre; c'est un poids P_1, distant de L de l'axe de rotation.

Quand l'équilibre est établi entre les deux forces, on a $F\rho = P_1L$.

Pour un tour, le travail de frottement est $F.2\pi\rho$ ou $2\pi P_1 L$.

F est la somme des frottements partiels aux différents points du collier; P_1 est la résultante de deux poids : l'un, ϖ, est le poids de la barre et du plateau, l'autre, P, est le poids ajouté. Les distances à l'axe de rotation sont d pour le poids ϖ et l pour P (l distance à l'axe du point d'appui du plateau). $P_1 L = \varpi d + Pl$.

Pour n tours par seconde, le travail résistant du frein est $2\pi n\,(\varpi d + Pl)$.

On peut supprimer le terme ϖd en faisant une expérience préalable.

Le frein n'étant pas serré, on détermine avec un dynamomètre la force p qu'il faut appliquer verticalement en c pour soutenir le frein et le plateau vide, on a $\varpi d = pl$. D'après cela, $2\pi n\,(P + p)\,l$ est le travail transmis

(1) Avec le frein de Prony, on peut mesurer soit le travail moteur total, soit un travail partiel qu'absorbent des outils que mène un même arbre.

pendant une seconde par l'arbre de couche, dans le fonctionnement normal de la machine.

PRINCIPE DE CARNOT

376. La continuité et la régularité du fonctionnement d'une machine sont assurées par la répétition de ses mouvements. Sadi Carnot a montré qu'une machine thermique, revenue à son état initial après une série de transformations, n'a produit de travail que s'il y a eu *passage de chaleur* d'un foyer de température supérieure à un réfrigérant de température inférieure. Ainsi, dans une machine à vapeur, pour un tour de manivelle, la vapeur de température t, qui pousse le piston, apporte dans le corps de pompe un nombre Q de calories; le condenseur, de température t', reprend Q'. La quantité de chaleur Q — Q' est convertie en un travail utilisable J(Q — Q'), en poussant le piston, en même temps qu'elle disparaît comme chaleur. La chaleur Q' n'a pas d'effet utile.

La fraction $\frac{Q - Q'}{Q}$, rapport de la chaleur utilisée à la chaleur dépensée, s'appelle le *coefficient économique*.

Le *coefficient économique maximum* d'une machine thermique ne dépend que des deux températures t et t', entre lesquelles elle fonctionne; *il est indépendant de la nature de l'agent de transformation qui pousse le piston,* que cet agent soit un gaz, de la vapeur d'eau ou toute autre substance. Le coefficient économique a pour valeur maximum $\frac{t - t'}{273 + t}$ (1). Si parfaite que soit la machine, son coefficient économique ne peut dépasser cette fraction; une partie Q' de la chaleur dépensée Q garde la forme de chaleur.

(1) Il résulte ainsi des recherches de Carnot que le coefficient économique d'une machine thermique n'est pas amélioré *en choisissant un autre corps que la vapeur d'eau* comme agent de transformation.

Le piston et la vapeur reviennent périodiquement à leur état initial. La série des transformations subies par la vapeur, constitue un **cycle**. Pour une machine thermique quelconque, à vapeur ou autre, Carnot a fait connaître un cycle dont le coefficient économique est *maximum*. C'est à ce cycle spécial que s'applique le coefficient économique $\frac{t - t'}{273 + t}$. Ce cycle n'est pas rigoureusement réalisable, on peut seulement chercher à s'en rapprocher le plus possible.

Pratiquement, les machines à vapeur décrivent un cycle de Carnot *imparfait*, et leur coefficient économique reste inférieur au coefficient économique maximum.

Le coefficient économique croît lorsque la température t' du réfrigérant diminue. Il serait égal à 1 pour $t' = -273^0$ (l'énergie calorifique serait utilisable en entier).

RENDEMENT DANS UNE MACHINE THERMIQUE

377. Les rapports entre la chaleur et le travail dans les **machines thermiques,** *qui transforment de la chaleur en travail,* sont régis par les deux *Principes de la Thermodynamique.*

1° Le **Principe de l'équivalence** ou de *la proportionnalité constante entre le travail effectué et la chaleur utilisée.* La chaleur utilisée disparaît comme chaleur.

2° Le **Principe de Carnot**, relatif à *la proportion de chaleur, qui peut être convertie en travail.* D'après ce principe, une machine thermique *ne peut restituer, sous forme de travail, qu'une fraction déterminée de l'énergie calorifique qu'elle reçoit.*

378. Pertes d'énergie dans une transformation d'énergie. — Une transformation d'énergie s'effectue avec pertes; les pertes ne proviennent jamais d'une annulation véritable d'énergie, mais de conversions et de transports partiels *inutilisables.*

Pertes d'énergie spéciales à une machine à vapeur. — 1° Une partie de la chaleur du combustible n'est pas cédée à la vapeur ; 2° une partie seulement de la chaleur possédée par la vapeur à son entrée dans le corps de pompe est convertie en travail; une autre partie passe au condenseur; 3° les mécanismes d'utilisation absorbent une fraction du travail effectué par la vapeur.

Une seule perte est irréductible. — Ces pertes peuvent être atténuées, sauf *une*, le passage de calories au condenseur.

379. Le **rendement industriel** est le rapport entre le *travail effectif* $\mathfrak{T}$, mesuré au frein sur l'arbre de couche, pendant un tour de manivelle et le travail dépensé JW, équivalent à toute la chaleur W du combustible brûlé pendant ce temps.

Étude du rendement. — Appelons Q le nombre de calories apportées par la vapeur dans le corps de pompe, et A le travail de cette vapeur sur le piston, le rendement $\frac{\mathfrak{T}}{JW}$ peut être mis sous la forme $\frac{Q}{W} \cdot \frac{A}{JQ} \cdot \frac{\mathfrak{T}}{A}$.

Chacune de ces trois fractions représente un rendement spécial.

I. $\frac{Q}{W}$ est la fraction de la chaleur dépensée, qui entre avec la vapeur dans le corps de pompe, cette fraction est inférieure à l'unité, car il y a perte de chaleur par production d'escarbilles, rayonnement, conductibilité, entraînement dans la cheminée avec les gaz de la combustion.

II. $\frac{A}{JQ}$ est la fraction de la chaleur apportée par la vapeur dans le

corps de pompe, qui est convertie en travail effectué par le piston; ce rapport, appelé spécialement *coefficient économique*, est inférieur à l'unité par la **nécessité d'un réfrigérant dans une machine thermique**, pour son fonctionnement régulier. Une quantité de chaleur Q′ passe dans le condenseur.

La valeur maximum du coefficient économique est donnée par le **principe de Carnot.**

Elle est $$\frac{A}{JQ} = \frac{Q - Q'}{Q} = \frac{t - t'}{273 + t}\text{ (1)}.$$

III. $\frac{\mathfrak{T}}{A}$ est la fraction du travail A effectué par le piston qui est transmise à l'arbre de couche; le travail indiqué A (**374**) est réduit par les frottements des mécanismes qui transforment le mouvement alternatif en mouvement de rotation, par le jeu du tiroir et des pompes.

En résumé, le **rendement industriel** est le produit de trois facteurs inférieurs à l'unité. Si la machine fonctionnait d'une façon *parfaite*, 1° toute l'énergie du combustible serait emmagasinée par la vapeur, on aurait $\frac{Q}{W} = 1$; 2° la chaleur convertie en travail n'éprouverait pas de perte par le fonctionnement des mécanismes et serait intégralement utilisable, on aurait $\frac{\mathfrak{T}}{A} = 1$. Mais le troisième rapport $\frac{A}{JQ}$ sera toujours au plus égal à $\frac{t - t'}{273 + t}$.

Pour la vapeur d'eau, à cause de l'accroissement rapide de la force élastique de la vapeur avec la température et de la limite de résistance des récipients métalliques, t ne dépasse guère 200°. Si $t = 200°$ et $t' = 30°$.

$$\frac{t - t'}{273 + t} = \frac{170}{473} = 0{,}36.$$

C'est avec une machine parfaite, entre ces limites de température, le maximum d'énergie utilisable.

En réalité, le rendement *industriel* d'une machine à vapeur n'est pas supérieur à 0,1.

Dans les machines à vapeur surchauffée et dans les moteurs à gaz, qui fonctionnent *entre des limites de température plus éloignées* que les simples machines à vapeur, le rapport $\frac{A}{JQ}$ prend une valeur plus grande.

Calcul de la dépense de combustible. — 1 gramme de charbon dégage en brûlant 8 Calories, ce qui correspond à 8.426 kilogrammètres. Une machine d'un cheval-vapeur produit en une heure 75.60.60 kilogrammètres. Si toute la chaleur du charbon était convertie en travail, la dépense en charbon d'une machine d'un cheval-vapeur serait de $\frac{75.60.60}{8.426}$ grammes *par heure*, env.

(1) Pour un moteur thermique quelconque, t et t' sont les tempéra[tures] [aux]quelles s'effectuent les transformations de l'agent qui transporte la chaleu[r].

dement industriel est $\frac{1}{10}$, la dépense est de 800 grammes. Il n'est pas rare que la dépense dépasse 3 kilogr. par cheval-heure.

MACHINES A EXPLOSION

380. Les moteurs à explosion utilisent l'énergie mécanique produite par la déflagration d'un *mélange d'air et de vapeur combustible.* La combustion n'est pas continue, mais due à une série d'explosions à intervalles réguliers, se succédant très rapidement.

Description (fig. 385). — *La combustion est interne;* elle a lieu dans un corps de pompe qui joue le triple rôle de foyer, de chaudière et de cylindre. Des gaz combustibles comprimés sont portés, par leur explosion, à une haute température; leur force élastique exerce une forte pression sur les parois du corps de pompe KM et sur le *piston* P qui est l'organe moteur. Le piston pousse une bielle *b* et celle-ci actionne un arbre de couche par l'intermédiaire d'une manivelle *m.* La machine est à *simple effet,* si la force expansive des gaz n'agit que sur une des faces du piston : le corps de pompe est ouvert à l'une de ses extrémités et fermé à l'autre.

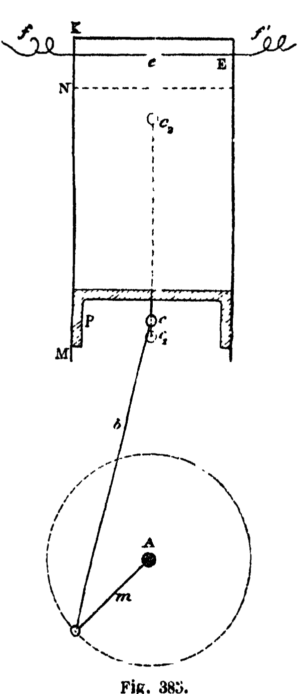


Fig. 385.

La *chambre d'explosion* NK est comprise entre l'extrémité fermée et le piston Dans cette chambre peuvent s'ouvrir : une *soupape d'admission* du mélange combustible et une *soupape d'échappement* des gaz brûlés. Au repos, ces deux soupapes sont maintenues fermées.

L'allumage du mélange gazeux se fait par deux fils de platine *f* et *f'*, entre lesquels éclate une *étincelle de bobine d'induction.*

Fonctionnement. — Nous prendrons comme exemple un moteur monocylindrique à *quatre temps* et à simple effet (1).

Le cycle des transformations comporte quatre temps, ou quatre courses consécutives du piston : deux allées et deux retours (pour deux tours de la manivelle et de l'arbre moteur).

Premier temps (allée du piston). — *Explosion des gaz et effet moteur.* — [illegible] iston [illegible] limite de sa course et voisin du fond du cylindre en N. [illegible] sont fermées et la chambre d'explosion NK renferme

(1) [illegible] voitures automobiles et les aéroplanes, on accouple plusieurs cylindres, [illegible] rise la marche sans modifier le fonctionnement.

un mélange comprimé (1) d'air et de gaz combustible. Une étincelle y éclate, une détonation a lieu, le piston est refoulé de N en P et le volant est lancé; l'énergie développée s'y emmagasine en partie.

Deuxième temps (retour du piston). — *Expulsion des gaz brûlés.* — Les gaz de l'explosion se sont refroidis par leur détente et par le contact des parois; le volant continue à tourner en vertu de sa force vive; le piston revient de P en N, la soupape d'échappement s'ouvre alors et les produits de la combustion sont évacués dans l'air extérieur (2).

Troisième temps (allée du piston). — *Aspiration du mélange explosif.* — Entraîné par le volant, le piston s'éloigne de nouveau du fond du cylindre. La soupape d'admission s'ouvre, le mélange détonant aspiré entre dans le cylindre et le remplit quand le piston est arrivé en P.

Quatrième temps (retour du piston). — *Compression du mélange explosif.* — Toujours entraîné par le volant, le piston revient vers le fond du cylindre et comprime le mélange détonant en le refoulant dans la chambre d'explosion (3). La soupape d'admission s'est fermée au commencement du retour du piston.

Le piston ne reçoit d'énergie du gaz que pendant un seul des quatre temps, ses trois autres mouvements sont entretenus par la force vive emmagasinée par le volant. L'allumage et l'ouverture des soupapes sont *commandés* par des cames dont les arbres sont entraînés par le moteur.

Refroidissement du corps de pompe. — Les explosions se produisant à des intervalles très rapprochés et la température dépassant 1500°, les parois du cylindre s'échauffent beaucoup; la décomposition des huiles de graissage rendrait le fonctionnement du piston irrégulier en produisant du grippage. Aussi, le refroidissement du cylindre, qu'on cherche à éviter dans la machine à vapeur, est ici nécessaire. On le réalise par une circulation continue d'eau froide autour du cylindre.

Un moteur à explosion ne se met pas en marche de lui-même comme une machine à vapeur. Dans le cas d'une faible puissance, on fait tourner directement l'arbre moteur avec une manivelle pour aspirer le gaz combustible, et pour le comprimer par le piston moteur.

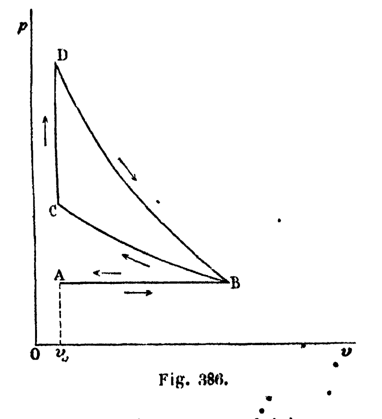


Fig. 386.

Mesure du travail. — Le travail *effectif* se mesure par le frein de Prony, le travail *indiqué* par l'indicateur de Watt. Dans le *premier temps* (fig. 386), la pression s'élève rapidement de C en D, puis baisse de D en B; dans le *deuxième temps*, le parcours est BA; la pression est égale à la pression atmosphérique; au

(1) **La compression entraîne une déflagration plus forte et une force élastique notablement plus élevée.**

(2) **En ces deux temps, l'arbre de la machine a tourné d'un tour complet.**

(3) **Dans ces deux derniers temps, l'arbre de la machine a fait un second tour.**

troisième temps, l'admission se fait à la pression atmosphérique de A en B; enfin au *quatrième temps*, il y a compression de B en C.

Rendement. — La grande différence entre la température élevée de l'explosion et la température de l'atmosphère où se fait l'échappement, pourrait conduire, d'après le principe de Carnot, à un rendement très supérieur à celui des machines à vapeur, mais une grande perte de chaleur est due au refroidissement du cylindre. Le rendement atteint 0,2.

Pour un travail continu, les moteurs à explosion coûtent plus cher que les machines à vapeur, à cause du prix élevé du combustible employé. Ils sont avantageux pour les travaux *intermittents*, par la rapidité de leur mise en marche. Surtout, ils présentent le grand avantage d'avoir une grande puissance sous un très faible poids.

Gaz employés. — Comme gaz combustible mélangé à l'air, on emploie soit du gaz d'éclairage, soit des gaz économiques dits gaz *pauvres* : gaz à l'eau, gaz au bois, air carburé. Dans les moteurs à explosion pour voitures et canots automobiles, on fait usage de vapeurs d'essence minérale.

TURBINES A VAPEUR

381. Dans une machine à vapeur ordinaire, il faut des organes intermédiaires pour passer du mouvement alternatif, à effort variable, du piston, au mouvement de rotation de l'arbre de couche. Une turbine à vapeur est une roue à aubes ou à ailettes sur lesquelles vient frapper la vapeur à sa sortie de la chaudière. L'axe de la roue est l'axe de l'arbre moteur. L'arbre tourne ainsi directement, *sans intermédiaire mécanique*, par la pression et la vitesse de la vapeur. Pour ne pas perdre de vapeur, la turbine est enfermée dans une caisse cylindrique étanche.

Les turbines à vapeur n'ont pas de volant, elles tournent à très grande vitesse. Cette vitesse se trouve réduite en augmentant le nombre des roues. Les ailettes sont habituellement très nombreuses et éloignées du centre de l'arbre. La vapeur se détend graduellement dans ses efforts successifs. Une turbine consomme, pour le même travail, moins de vapeur qu'une machine à piston, elle tient moins de place, n'engendre pas de trépidations; elle convient pour obtenir un mouvement de rotation accéléré; elle est employée, en particulier, pour faire tourner les *hélices des navires*.

CONSERVATION DE L'ÉNERGIE

382. Variétés d'énergies. — Un système qui possède une capacité de travail s'appelle une source d'énergie. Les sources

d'énergie sont le siège de mouvements ou de groupements spéciaux de molécules matérielles. Elles sont variées quant à leur origine, mais elles se ramènent toutes aux deux énergies : cinétique et potentielle (**39**). Pour n'avoir pas à distinguer, dans chacune des énergies variées, la partie cinétique et la partie potentielle, on étudie leurs effets en conservant leur nom d'origine : mécanique, calorifique, chimique, sonore, lumineuse, électrique, etc.

Les énergies se transforment les unes dans les autres et la Physique a pour objet principal l'étude de leurs transformations.

Énergie calorifique. — L'énergie calorifique est à la fois *potentielle* par la variation des positions relatives des molécules des corps chauds, et *cinétique* par l'accroissement de leurs excursions.

Énergie chimique. — Les combinaisons chimiques dégagent le plus souvent de la chaleur. Ainsi, dans la combustion du carbone dans l'air, le système carbone et oxygène devient anhydride carbonique en produisant de l'énergie calorifique. Avant la combustion, le système des éléments, carbone et oxygène réunis, possédait une énergie potentielle chimique. Cette énergie chimique a été convertie, au moment de la combinaison, en énergie calorifique.

Énergie électrique. — Une quantité d'électricité élevée à un certain potentiel possède une énergie potentielle, dite électrique (1). Diverses énergies sont converties par les sources d'électricité en énergie électrique : une énergie chimique dans les piles, une énergie mécanique dans les machines électrostatiques et électromagnétiques. L'énergie électrique reproduit, par le courant, diverses variétés d'énergie : calorifique, chimique, mécanique.

L'énergie électrique est particulièrement une *énergie intermédiaire*. L'exemple suivant en donne une idée. Une chute d'eau fait tourner une machine dynamoélectrique. En tombant, l'eau produit un travail par le déplacement de son poids. La machine dynamoélectrique donne, de son côté, en tournant, naissance à un courant électrique. Si l'échauffement total du circuit électrique dégage un nombre Q de calories, le travail de la chute d'eau est $4{,}18.10^7$ Q ergs; l'énergie électrique n'a été qu'un intermédiaire.

Phénomènes vitaux. — L'analyse des phénomènes vitaux offre des applications constantes du principe de la conservation de

---

(1) Une quantité d'électricité ne possède pas par elle-même une énergie; quand son potentiel est devenu supérieur à celui du sol, elle a acquis une énergie potentielle utilisable. De même, un corps pesant n'acquiert une capacité de travail que s'il est porté à une certaine hauteur.

l'énergie. Les êtres vivants sont des transformateurs d'énergie; ils convertissent en énergie calorifique et en travail mécanique l'énergie chimique que les aliments dégagent dans leurs tissus.

Radiations solaires. — Les radiations solaires paraissent être la source de toute énergie à la surface de notre globe.

Le végétal vit par des transformations chimiques effectuées avec le secours des radiations solaires. L'animal renouvelle son énergie aux dépens de l'énergie du végétal ou de l'animal dont il se nourrit. La chaleur solaire réduit en vapeurs les eaux des mers et des lacs; les pluies dues à la condensation de ces vapeurs entretiennent les cours d'eau qui transportent les navires et les chutes d'eau qui mettent en mouvement les roues hydrauliques. C'est encore à l'énergie solaire que nous devons nos combustibles : énergie solaire actuelle, pour le bois; énergie solaire emmagasinée dans les siècles passés, pour la houille.

L'énergie des chutes d'eau se renouvelle par le jeu des phénomènes atmosphériques et leur emploi industriel économise la houille qui sera épuisée tôt ou tard.

383. Système isolé. — Un système est dit isolé quand il n'emprunte et ne cède rien à un milieu extérieur.

L'énergie totale d'un système isolé reste constante. C'est l'énoncé du principe de la conservation de l'énergie. Cet énoncé, déduit de l'observation, exprime que pour un système isolé, c'est-à-dire soustrait à toute influence étrangère, l'énergie du système n'est accrue ni diminuée par des actions mutuelles entre les corps qui le composent. Son énergie totale, somme de ses énergies cinétique, potentielle et calorifique, est invariable. Il ne se produit que des changements de distribution ou des transformations d'énergie. Une énergie disparaissant, il s'en produit une autre équivalente; l'équivalence de la chaleur et du travail en est un exemple.

Quand un système revient à son état initial, après avoir décrit un cycle fermé, toutes ses parties ayant repris les mêmes positions et les mêmes vitesses, son énergie cinétique et son énergie potentielle reprennent les mêmes valeurs. Dans ces conditions, il ne peut avoir accompli un travail extérieur sans qu'on lui ait fourni une énergie étrangère, conformément au théorème des forces vives (**38**). L'intervention nécessaire d'une énergie étrangère entraîne l'impossibilité d'un travail effectué sans une dépense correspondante d'énergie, ou l'***impossibilité du mouvement perpétuel.*** Cette impossibilité est indépendante de tout mécanisme de machine, car

une machine est un appareil intermédiaire qui ne crée pas de travail et ne fait qu'en modifier les facteurs (**40**).

Un examen attentif s'impose pour limiter un système qu'on appellera isolé, afin d'y comprendre les corps qui peuvent être en échange d'énergie avec lui.

DÉGRADATION DE L'ÉNERGIE

384. Les différentes formes de l'énergie : force vive, travail, chaleur, se transforment les unes dans les autres en proportions équivalentes. Les transformations entre force vive, énergie potentielle et travail peuvent être intégrales, si du moins on néglige les *pertes accessoires,* telles que chocs et frottements, qui accompagnent les transformations, dans le fonctionnement toujours imparfait des organes de machines.

L'énergie calorifique doit être considérée à part; en effet, si le travail peut être intégralement converti en chaleur, la conversion régulière de chaleur en travail ne peut pas être complète, comme si la chaleur était une *forme inférieure de l'énergie.*

Aussi, bien qu'une calorie et 426 kilogrammètres soient dits *équivalents*, il n'est pas indifférent de disposer d'une calorie ou de 426 kilogrammètres. Les 426 kilogrammètres peuvent toujours produire un travail égal, mais de la calorie on ne pourra tirer, en travail régulier, qu'une faible fraction de 426 kilogrammètres.

Quand une énergie calorifique JQ, fournie par un foyer, est employée à effectuer un travail T, on a toujours $JQ = T + JQ'$. En effet, la chaleur ne peut être convertie en travail par une machine thermique que s'il y a une chute de chaleur concomitante, d'un corps chaud à un corps froid ou d'un foyer à un réfrigérant. Une énergie JQ' est reçue par le réfrigérant de la machine thermique.

Comme la chaleur ne peut remonter d'elle-même à une température supérieure, ou passer d'un corps froid à un corps chaud, une calorie à 0° est pratiquement inférieure à une calorie à 100°, car une calorie à 0° possède, en moins, la capacité de travail qui correspond à une différence de température de 100°. La perte d'énergie qui accompagne le passage d'une calorie à une température inférieure s'appelle une *dégradation de l'énergie.*

Si la quantité d'énergie calorifique d'un système isolé est limitée, comme les températures des corps inégalement chauds tendent

constamment à s'égaliser par contact ou par rayonnement, puisque la chaleur passe *d'elle-même* des corps chauds aux corps froids, les chutes *utilisables* possibles de chaleur tendent à devenir plus rares.

D'autre part, dans la pratique, les énergies mécaniques éprouvent un déchet dû aux frottements qui sont inévitables. L'énergie électrique ne peut aussi être convertie en travail sans qu'il y ait, en même temps, production de chaleur dans les conducteurs traversés par les courants. En définitive, toutes les énergies, les énergies mécaniques elles-mêmes, tendent, dans la suite de leurs conversions, à se transformer en chaleur et, si l'énergie totale d'un système isolé est constante, l'énergie utilisable disparaît graduellement.

S'il s'agit d'un système, tel que notre système solaire, qui perd, par rayonnement dans l'espace, une énorme quantité d'énergie calorifique et dont l'énergie totale diminue par cela même, les considérations précédentes conduisent à une conséquence intéressante. La source de toute énergie dans ce système étant *calorifique*, puisqu'elle est empruntée à la chaleur solaire et la tendance à l'égalisation des températures étant incessante, l'énergie totale va constamment *en se dégradant*, c'est-à-dire en perdant de sa valeur utilisable, et cela d'une façon irrémédiable.

HISTORIQUE

Thermomètres. — L'invention du thermomètre date de la fin du XVIe siècle; à cause de la grande dilatabilité des gaz, les premiers thermomètres, et en particulier celui de *Galilée*, furent des thermomètres à air; c'étaient des thermoscopes. Les Académiciens de Florence (1557-1566) firent usage de thermomètres à alcool, tous identiques. A la fin du XVIIe siècle, le mercure fut substitué à l'alcool et la graduation se fit avec des points fixes. Les perfectionnements dans la construction des thermomètres sont spécialement dus à *Fahrenheit* (1720) et à *Deluc* (fin du XVIIIe siècle). *Dulong* et *Petit*, puis *Regnault*, firent ressortir les avantages des thermomètres à gaz pour les mesures de précision.

Dilatations. — Le pyromètre à cadran avait été employé par *Musschenbroek* à la comparaison des dilatations linéaires des solides; en 1778, *Lavoisier* et *Laplace* imaginent une disposition analogue, plus sensible et plus précise. En 1816, *Dulong* et *Petit* mesurent la dilatation absolue

du mercure. En 1837, *Despretz* fixe à 4° la température du maximum de densité de l'eau. En 1703, *Amontons* avait reconnu que, de 0° à 100°, la force élastique d'une masse d'air augmentait d'un tiers sous volume constant; les recherches de *Gay-Lussac* sur la dilatation des gaz datent de 1807; les mesures précises de *Rudberg*, à Upsal (1835), et de *Regnault* (1840), fixent définitivement le coefficient de dilatation de l'air sec.

Vapeurs. — Les forces élastiques maxima de la vapeur d'eau, de 0° à 100°, ont été mesurées par *Dalton* sur un baromètre à vapeur; *Regnault*, en 1844, les détermine avec une extrême exactitude jusqu'aux limites où la vapeur peut être utilisée industriellement. Les nombres de *Magnus*, de Berlin, publiés à la même date, s'accordent avec ceux de *Regnault*. *Dalton* montre que sa loi du mélange des gaz s'applique à un mélange de gaz et de vapeur, chaque élément se comportant comme s'il était seul.

A la fin du XVIIIe siècle, *Van Marum* avait liquéfié le gaz ammoniac sous une pression de six atmosphères, à la température ordinaire. Au commencement du XIXe siècle, *Monge* avait liquéfié l'acide sulfureux en le refroidissant; par la compression et le refroidissement combinés, *Faraday* avait réussi à liquéfier la plupart des gaz connus; six avaient résisté, on les avait appelés permanents. En 1869, *Andrews*, à Belfast, déduit de l'étude de l'acide carbonique l'existence d'une température critique au-dessus de laquelle un gaz ne peut plus exister à l'état liquide, si puissante que soit la pression. En 1877, *Cailletet* utilise l'abaissement considérable de température dû à la détente d'un gaz pour amener un gaz permanent au-dessous de son point critique et le liquéfier.

La force d'expansion de la vapeur d'eau était connue d'*Héron d'Alexandrie*; en 1615, *Salomon de Caus* songe à l'utiliser. La première machine où la force élastique de la vapeur ait poussé un piston est due à *Denis Papin* (1690). Elle était à simple effet; la pression atmosphérique produisait le retour du piston. La machine à double effet fut créée par *Watt* (de 1760 à 1800) qui énonça le principe de la paroi froide, fit usage d'un condenseur séparé du corps de pompe, inventa le tiroir, la manivelle, employa la détente. La chaudière tubulaire, qui a permis de réaliser la locomotive, est due à *Seguin*.

Sadi Carnot, en 1824, fixa les conditions dont dépend le rendement d'un moteur thermique.

Calorimétrie. — La méthode des mélanges est due à *Black*. *Regnault* l'a perfectionnée et rendue rigoureuse.

Équivalent mécanique de la calorie. — *Rumford*, frappé de l'échauffement considérable que produit le forage des canons, fut le premier qui mesura la chaleur développée dans le frottement (1799); mais il n'évalua pas le travail dépensé. En 1842, un médecin d'Heilbronn, *J.-R. Mayer*, énonce le principe de l'équivalence de la chaleur et du travail, en fait ressortir les conséquences et calcule correctement l'équivalent mécanique de la calorie. *Joule*, de Manchester, entreprit, en 1843, des expériences pour mesurer l'équivalent mécanique de la calorie; sa détermination par le frottement de l'eau date de 1849. Vers 1850, *Hirn*, de Colmar, fait servir une machine à vapeur industrielle à la même détermination.

Helmholtz (1847), *W. Thomson* et surtout *Clausius*, professeur à Bonn,

en s'appuyant sur le principe énoncé par Mayer et sur les travaux relatifs aux machines thermiques de Sadi Carnot, établissent la théorie mécanique de la chaleur et développent, dans toutes les branches de la physique, les conséquences du principe de la conservation de l'énergie.

Rayonnement calorifique. — L'étude du rayonnement calorifique, entreprise au commencement du XIXe siècle par *Leslie,* professeur à Édimbourg, est poursuivie en France par l'Italien *Melloni* qui imagine le thermomultiplicateur, découvre les propriétés du sel gemme, sépare les rayons de chaleur de diverses réfrangibilités et fait connaître un grand nombre de faits nouveaux, principalement sur les rayons calorifiques obscurs. L'Américain *Langley* a substitué le bolomètre au thermomultiplicateur pour l'observation des radiations calorifiques peu réfrangibles.

ACOUSTIQUE

L'Acoustique a pour objet l'étude des **sons**. Un *son* produit une impression sur l'organe de l'ouïe.

385. Vibrations sonores. — De nombreuses expériences prouvent que toutes les fois que l'oreille, à l'état physiologique, éprouve la sensation d'un son, le corps sonore est le siège de mouvements vibratoires. Les vibrations des corps *sonores* sont des oscillations, analogues à celles d'un pendule, effectuées de part et d'autre d'une position moyenne, reproduites à des intervalles très rapprochés.

1° Soit une **lame d'acier** fixée, à l'une de ses extrémités C, entre les mâchoires d'un étau (fig. 387); si l'on infléchit l'extrémité libre D et qu'on l'abandonne, elle revient à la direction verticale, la dépasse en vertu de sa vitesse acquise et exécute, de part et d'autre, des mouvements de va-et-vient. Toutes les particules exécutant leurs oscillations dans le même temps, l'amplitude seule diffère avec la distance de chaque point à l'extrémité fixe. Lorsque la lame est longue, on voit les vibrations et on peut les compter, mais on n'entend aucun son. Le nombre des vibrations par seconde croît quand on raccourcit la lame et il arrive un moment où l'oreille *perçoit un son*. A ce moment, les vibrations sont *trop nombreuses pour être comptées directement;* par suite de la persistance des impressions sur la rétine, la lame est vue simultanément dans toutes ses positions.

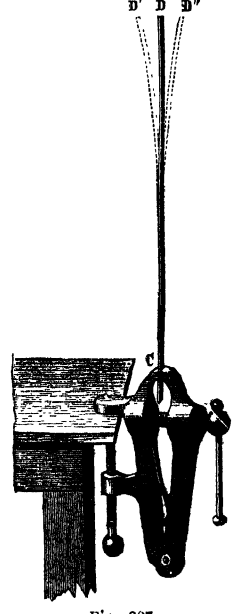


Fig. 387.

2° En pinçant en son milieu ou en faisant résonner par l'archet une **corde élastique** MN, fixée à ses extrémités et tendue, elle prend un état vibratoire. La rapidité des vibrations ne laisse pas distinguer la corde dans ses positions successives, l'œil la voit sous l'aspect d'un fuseau renflé en son milieu (fig. 388).

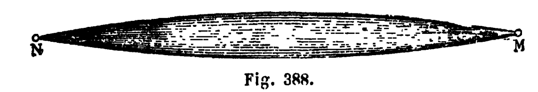
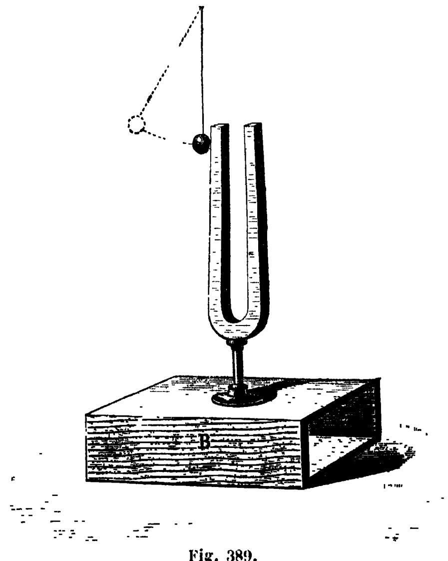
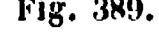


Fig. 388.

3° On fait parler un **diapason**, en passant entre les branches une tige de bois un peu plus grosse que leur écartement. Une bille d'ivoire suspendue à un fil (fig. 389), et approchée de l'une des branches, est projetée par le choc du diapason, elle retombe pour être lancée de nouveau, jusqu'à extinction du son.




Fig. 389.

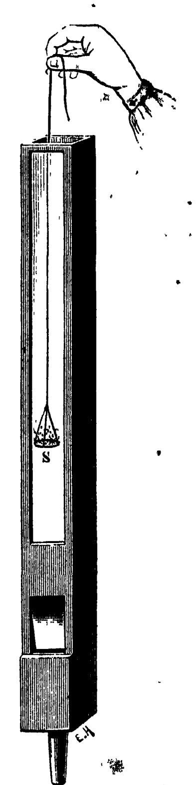


Fig. 390.

4° Dans les **instruments à vent** le corps sonore est une masse gazeuse. Montons sur une soufflerie un **tuyau**, dont l'une des parois est en verre, et faisons-le parler. Si nous descendons à l'intérieur une membrane S, tendue sur un anneau de bois et soutenue par un fil, les vibrations de l'air se transmettent à la membrane qui fait sautiller les grains de sable déposés à sa surface (fig. 390).

5° Le mouvement vibratoire est étudié plus complètement en fixant à l'une des branches d'un diapason D une pointe métallique s

perpendiculaire au plan des branches. En faisant passer rapidement, contre la pointe, une plaque de verre enfumée P, on obtient *une ligne sinueuse continue et régulière; chaque dent correspond à une vibration du corps sonore* (fig. 391).

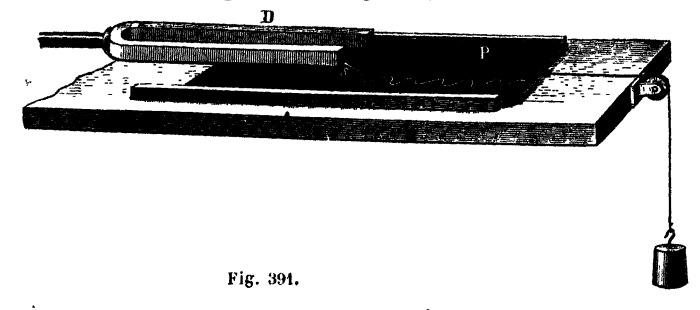


Fig. 391.

Un corps ne peut vibrer que s'il est élastique, c'est-à-dire susceptible de revenir à sa position d'équilibre quand on l'en a écarté; *un corps n'est donc sonore que s'il est élastique.*

386. Transmission d'un mouvement vibratoire. — Les vibrations d'un corps sonore ne peuvent impressionner l'oreille que si elles lui sont transmises. *La transmission a lieu par un milieu élastique.* Quand un milieu élastique intermédiaire fait défaut, le corps sonore n'est pas entendu.

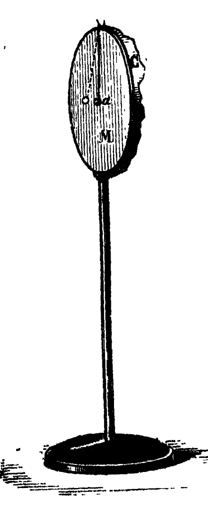


Fig. 392.

L'air transmet les vibrations en vibrant lui-même ; on le démontre en plaçant, sur le trajet des vibrations d'un fort timbre, une membrane mince et élastique M, tendue sur un cadre vertical C, et le long de laquelle est suspendu un léger pendule *a* (fig. 392).

Les *corps solides durs* transmettent bien les vibrations des corps sonores. L'oreille, appliquée à l'une des extrémités d'une longue poutre, entend le faible bruit produit, à l'autre extrémité, par le grattement d'une épingle ou par le tic-tac d'une montre.

La transmission du son s'opère aussi par les *liquides*. Un plongeur entend les sons produits dans l'eau ou sur le rivage.

Les corps solides dépourvus d'élasticité tels que le duvet, les tentures, les tapis, les corps mous, ne vibrent pas et *éteignent le son.*

Une cloison rigide se comporte comme un corps transparent pour le son, un matelas comme un corps opaque.

Le son ne se propage pas dans le vide. — Dans un ballon de verre à robinet, une clochette est suspendue à la garniture métallique par un cordon de soie (fig. 393). On entend la clochette si on l'agite quand le ballon est plein d'air, même à robinet fermé; on la secoue sans rien entendre quand le vide a été fait. Le son renaît si l'on rend l'air. En ballon ou sur une montagne, le son de la voix s'affaiblit par suite de la raréfaction de l'air.

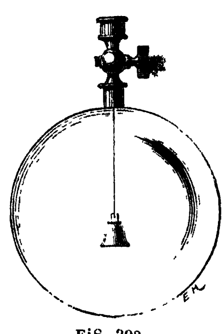


Fig. 393.

VITESSE DU SON

La propagation du son n'est pas instantanée. C'est ainsi qu'il s'écoule quelques instants entre la vue de la fumée, qui sort d'une arme à feu éloignée, et l'audition du bruit.

Dans un milieu qui offre *la même élasticité en tous sens* (gaz, liquides, métaux, etc.), la propagation se fait avec la même vitesse en toute direction. Dans un milieu cristallisé qui n'appartient pas au système cubique, la vitesse dépend de la direction.

387. Mesure de la vitesse du son dans l'air. — Les premières mesures précises de la vitesse du son dans l'air furent exécutées en 1738 entre Montmartre et Montlhéry.

Méthode. — Des observateurs étaient placés, les uns à une station A, les autres à une station B.

En A, on tirait un coup de canon; l'inflammation de la poudre et l'explosion avaient lieu simultanément; en B, on notait à l'aide de compteurs : 1° l'instant où l'on voyait l'inflammation; 2° l'instant où l'on entendait l'explosion. La propagation de la lumière est tellement rapide (300 mille kilomètres par seconde), que la lueur était perçue en B à l'instant où le son était produit en A. L'intervalle, mesuré en B, entre la lueur et le son, était le temps que le son avait mis à franchir la distance des deux stations.

Le mouvement de propagation est uniforme. Si l'on échelonne entre les deux stations plusieurs groupes d'observateurs, le nombre de secondes, compté entre la lueur et le son, est proportionnel aux distances du lieu de l'explosion.

La propagation étant uniforme, *la vitesse du son est l'espace que le son parcourt en une seconde.* D désignant la distance des deux stations, θ le temps observé, $\frac{D}{\theta}$ est la vitesse.

Influence du vent. — La vitesse du son étant très grande par rapport à la vitesse du vent, l'influence de l'entraînement du gaz est petite.

On corrigeait cette influence, par la méthode des *coups réciproques*, en tirant un coup de canon alternativement à chaque station, de 5 minutes en 5 minutes. La moyenne des vitesses observées consécutivement, pour deux propagations de sens contraires, est la vitesse en air calme. Cette moyenne était sensiblement la même, quelle que fût la vitesse du vent (1).

Méthode graphique de Regnault. — Regnault mesura la vitesse soit à l'air libre, soit dans de larges tuyaux longs de plusieurs kilomètres, remplis d'air. Elle fut la même dans les deux cas (2).

Sa méthode était exempte des erreurs d'appréciation (3). Il réalisait *automatiquement*, par un procédé électrique, *l'enregistrement* du

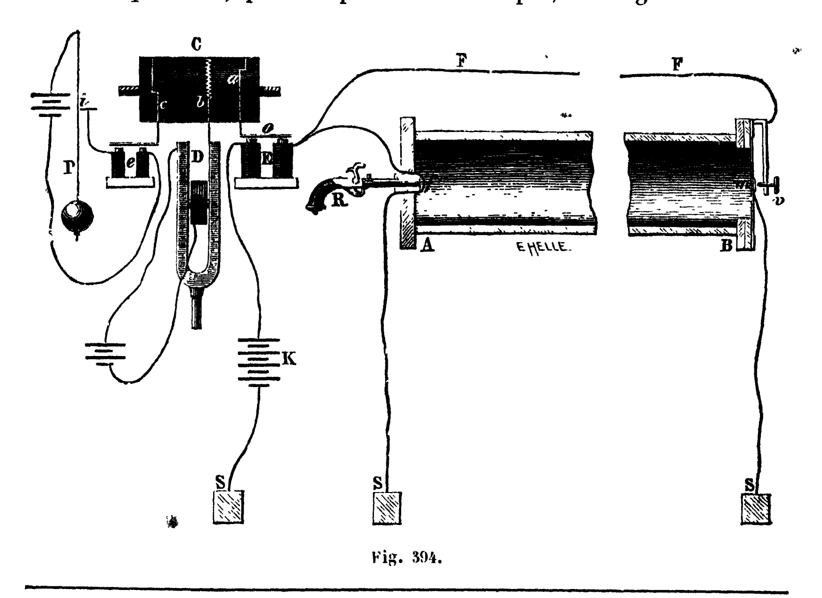


Fig. 394.

(1) Le vent augmente la vitesse des sons de même sens et diminue la vitesse des sons de sens inverse. Il ne modifie pas la vitesse de propagation dans une direction perpendiculaire à la sienne. V étant la vitesse du son dans l'air calme, v la vitesse observée, w la vitesse du vent, $v = V + w$ si le vent souffle dans le sens où l'on observe la propagation, $v = V - w$ si le vent souffle en sens opposé.

Soit α l'angle des deux directions, $w \cos \alpha$ est la composante de la vitesse du vent dans la direction de la propagation ; on a pour deux propagations de sens contraires :

$$v = V + w \cos \alpha \quad \text{et} \quad v' = V - w \cos \alpha \quad \text{d'où} \quad V = \frac{v + v'}{2}.$$

(2) L'influence des parois rend la vitesse un peu plus faible dans un tuyau étroit.

(3) Un observateur qui reçoit la lumière au temps t, la perçoit à un temps $t + \varepsilon$ et pointe sur le compteur au temps $t + \varepsilon + \varepsilon'$; le temps précis où les vibrations atteignent le tympan étant t_1, le son est perçu au temps $t_1 + \varepsilon_1$, et le pointage est fait au temps $t_1 + \varepsilon_1 + \varepsilon'_1$. Au lieu de $t_1 - t$, on observe $t_1 + \varepsilon_1 + \varepsilon'_1 - (t + \varepsilon + \varepsilon')$; $\varepsilon_1 + \varepsilon'_1$ et $\varepsilon + \varepsilon'$ diffèrent pour un même observateur et avec les observateurs. Toutefois la différence $\varepsilon_1 + \varepsilon'_1 - (\varepsilon + \varepsilon')$ reste très petite.

moment de l'explosion et l'enregistrement du moment de l'arrivée du son sur une membrane *à contact* (fig. 394).

Au moment où la membrane tendue vibrait par l'arrivée d'une vibration, une petite plaque conductrice fixée au centre de la membrane fermait un courant par son contact avec une vis métallique. La fermeture du courant par un électro-aimant inscrivait un signal.

Sur le trajet compris entre les deux stations, on peut disposer plusieurs membranes à contact, espacées à des distances connues, et observer les inscriptions successives.

A l'aide d'un fil télégraphique F, établi entre deux stations A et B, l'ébranlement de l'air, produit à la station A par l'explosion d'une arme à feu R, rompait en *f* le circuit d'une pile et provoquait immédiatement, par le recul du contact d'un électro-aimant E, l'inscription d'un signal sur un cylindre enregistreur C. A la station B, la membrane conductrice *m* recevait la vibration, venait toucher une vis *v*, rétablissait le circuit électrique, et ramenait le contact du même électro-aimant E, ce qui inscrivait un second signal sur le cylindre C. L'inscription sur C, des oscillations d'un *pendule* à secondes P, et des vibrations d'un *diapason* D donnant les centièmes de seconde, fournissait le temps employé par le cylindre pour tourner de l'arc compris entre les génératrices des deux signaux, ou la durée de la transmission entre A et B.

Résultats. — Dans l'air calme, sec et à 0°, la vitesse du son est de 331 mètres par seconde; elle *croît avec la température :* à t^0, elle est $331\sqrt{1+\alpha t}$, α étant le coefficient de dilatation de l'air; à 15°, elle atteint 340 mètres [1]. A une même température, la vitesse du son est *indépendante de la force élastique* du gaz [2] : elle est la même dans les plaines et sur les montagnes, où l'air est plus raréfié; elle est la même dans le sens vertical et dans le sens horizontal. Tous les sons, forts ou faibles, graves ou aigus, *se propagent également vite;* un air musical n'est donc pas altéré par la distance.

Dans un gaz de *densité d par rapport à l'air,* la vitesse, à t^0, est :

$$331\sqrt{\frac{1+\alpha t}{d}}.$$

(1) Pour de petites valeurs de t, $\sqrt{1+\frac{t}{273}}$ se réduit à $1+\frac{1}{2}\cdot\frac{t}{273}$.

(2) La vitesse du son dans l'air à 0°, a pour expression théorique, en centimètres, $V_0=\sqrt{\frac{p_0}{a_0}\cdot\frac{C}{c}}$, p_0 est la pression exercée par l'atmosphère à 0° par centimètre carré de surface, a_0 la masse d'un centimètre cube d'air à 0° sous la pression p_0; $\frac{C}{c}=1{,}41$ est le rapport des deux chaleurs spécifiques de l'air (C sous pression constante, c sous volume constant); a_0 étant proportionnel à p_0, V_0 est indépendant de la force élastique de l'air au lieu de l'observation.

La densité de l'hydrogène étant 16 fois plus petite que celle de l'oxygène, la vitesse de propagation dans l'hydrogène est 4 fois plus grande que dans l'oxygène

388. Vitesse de propagation du son dans l'eau (fig. 395). — En 1827, Colladon et Sturm ont mesuré la vitesse de propagation

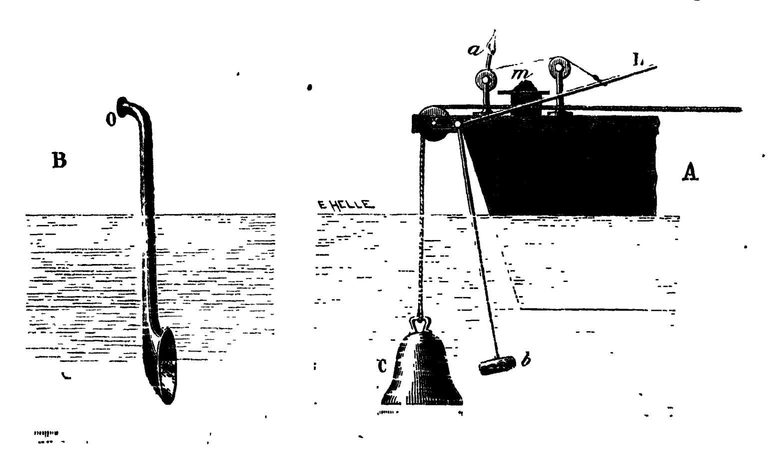


Fig. 395.

du son dans l'eau du lac de Genève, entre deux bateaux amarrés à une distance l'un de l'autre d'environ 13 kilomètres. A la station A, était suspendue une cloche C immergée dans l'eau. A un moment donné, en appuyant sur un levier L, on frappait la cloche avec un marteau *b* et on abaissait une mèche allumée *a* qui enflammait un tas de poudre *m*, au moment précis où le son était produit. A la station B, le pavillon d'un cornet acoustique en tôle était plongé dans l'eau : il était rempli d'air et fermé par une membrane tendue tournée vers la cloche : la partie supérieure et étroite O du cornet sortait de l'eau et aboutissait à l'oreille d'un observateur. Le temps écoulé entre l'apparition de la flamme et la réception du son par la membrane donnait le temps de la propagation entre les deux stations. La vitesse fut de 1435 mètres par seconde, dans l'eau à 8°.

389. Vitesse de propagation du son dans la fonte de fer. — Une conduite en fonte de longueur L, remplie d'air, était choquée à l'une de ses extrémités; le son était transmis à la fois par le métal et par l'air du tuyau; on notait le temps τ qui s'écoulait entre les deux perceptions.

Soit V la vitesse dans l'air, x la vitesse dans la fonte; $\frac{L}{V}$ est la

durée de propagation par l'air du tuyau, $\frac{L}{x}$ la durée pour la fonte.

L'équation $\tau = \frac{L}{V} - \frac{L}{x}$ donne x, puisqu'on connaît V.

La vitesse dans la fonte était $10\frac{1}{2}$ fois la vitesse dans l'air.

RÉFLEXION DU SON

390. Un son se réfléchit sur un plan rigide, comme la lumière sur un miroir. On appelle *rayon sonore* toute direction rectiligne issue de la source; la ligne droite qui joint un point sonore O à un point I du plan est un *rayon incident,* ce rayon se réfléchit en I (fig. 396).

Lois de la réflexion du son. — Les lois de la réflexion du son sont celles de la réflexion de la lumière (**443**). 1° *Le rayon réfléchi est dans le plan d'incidence,* plan du rayon incident et de la normale au point d'incidence. 2° *L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence;* les deux rayons sonores, incident et réfléchi, font le même angle avec la normale au point d'incidence.

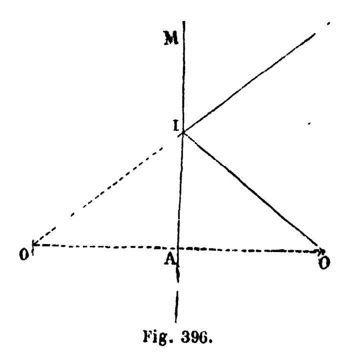


Fig. 396.

Il résulte de là que, si un centre sonore O est placé devant un plan AM (fig. 396), les rayons réfléchis semblent venir de O′, symétrique de O par rapport au plan ; ce point symétrique est une *image sonore* (**444**).

Expérience des miroirs conjugués. — L'expérience des miroirs conjugués vérifie l'identité des lois géométriques de la réflexion pour le son, la chaleur et la lumière.

Deux miroirs sphériques concaves sont disposés en face l'un de l'autre, à une distance de plusieurs mètres; leurs surfaces concaves se regardent et leurs *axes de figure coïncident.* On dispose une bougie au foyer principal F du premier miroir ; les rayons lumineux qui en émanent sont réfléchis parallèlement à l'axe commun des deux miroirs et concentrés, après une nouvelle réflexion, au foyer principal F′ du deuxième miroir; là, on les reçoit sur un petit écran. Ayant remplacé la bougie par une montre, on place en F′ l'oreille ou mieux le pavillon d'un cornet acoustique qui intercepte moins de rayons sonores (fig. 397) : on entend le tic-tac

de la montre; il n'est plus perçu dès qu'on s'écarte du foyer.

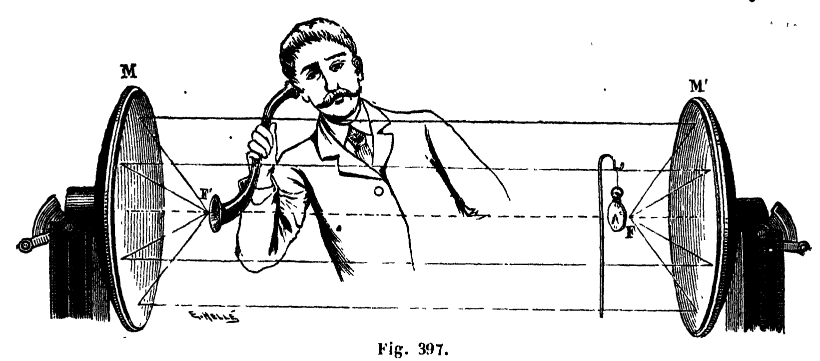


Fig. 397.

La superposition de rayons réfléchis aux rayons directs rend l'audition meilleure dans certaines parties d'une salle; elle est utilisée dans les abat-voix qui surmontent les chaires à prêcher, dans le porte-voix et dans le cornet acoustique.

Le **porte-voix** transmet le son à grande distance. Les rayons sonores réfléchis sur les parois du tube conique d'un porte-voix forment un faisceau parallèle dirigé suivant l'axe de l'instrument.

Le **cornet acoustique**, porte-voix renversé, employé par les personnes qui ont l'ouïe dure, est un tube conique dont on introduit le bout étroit dans l'oreille, tandis que le pavillon est tourné vers la personne qui parle. Il recueille les rayons sonores qui frappent sa partie élargie; par des réflexions multiples sur ses parois, il les fait converger en un faisceau qui pénètre dans le conduit auditif externe.

391. Échos. — On appelle *écho* la répétition d'un son réfléchi par un obstacle, tel qu'un mur, un bois, des rochers.

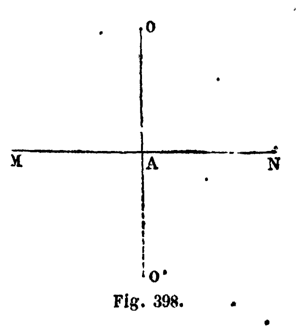


Fig. 398.

Supposons un observateur O placé en face d'une surface réfléchissante plane MN, à une distance AO $= d$. Un son qu'il émet est réfléchi comme s'il venait de l'image virtuelle O′ du centre sonore (fig. 398). Entre l'instant d'émission et l'instant de retour d'un son extrêmement bref, après un trajet $2d$ pour l'aller et le retour, il s'est écoulé un temps $\frac{2d}{V}$ (V vitesse du son).

Si le son réfléchi revient à l'observateur avant $0^{sec},1$, qui est la durée moyenne de la *persistance* d'une sensation sonore, la nou-

velle sensation prolonge simplement la première. Il n'y a écho que si le son met au moins $0^{sec},1$ à parcourir 2OA. Le son parcourant, à 15^0, 34 mètres en $0^{sec},1$, OA doit être supérieur à 17 mètres. Un observateur, placé à un peu plus de 17 mètres d'un mur, percevra donc un écho, *s'il émet un son bref* (fig. 399).

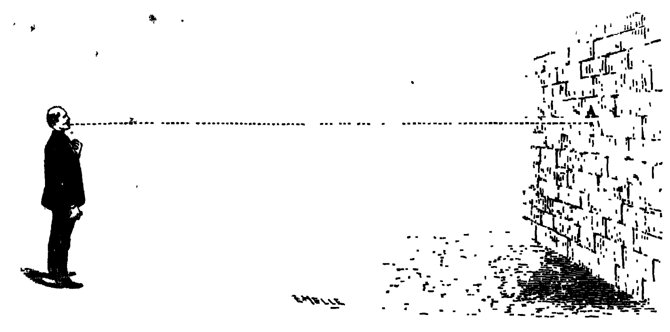


Fig. 399.

Les sons *articulés* exigent une distance minimum notablement plus grande pour que l'écho soit net. Admettons qu'on entend distinctement quatre syllabes par seconde; pour que l'audition d'une syllabe réfléchie suive immédiatement l'audition d'une syllabe directe, il faut qu'il s'écoule $\frac{1}{4}$ de seconde entre le commencement du son direct et le commencement du son réfléchi; la distance OA doit donc être telle que $\frac{2.OA}{V} = \frac{1}{4}$; $OA = \frac{V}{8} = 42^m,5$. A cette distance, si l'on prononce une seule syllabe, la syllabe réfléchie suit immédiatement. Si plusieurs syllabes sont prononcées sans interruption, les premières syllabes réfléchies se superposent, pour l'oreille, aux syllabes directes; étant moins intenses, elles sont couvertes par les directes; la dernière réfléchie arrive seule, quand le son direct a cessé, et semble seule répétée. L'écho est *monosyllabique.*

Les n dernières syllabes seront répétées si la distance OA est égale à n. 42,5. L'écho sera *polysyllabique.*

Si la même syllabe est répétée plusieurs fois, l'écho est dit *multiple.* Deux murs parallèles éloignés peuvent produire un écho multiple, comme deux miroirs parallèles donnent des images multiples.

Dans une petite salle, où les murs, le plancher, le plafond renvoient le son après des temps inappréciables, les sons réfléchis se confondent, syllabe par syllabe, avec les sons directs et les *renforcent.* Si la salle est assez grande pour que la superposition ne soit plus exacte, il y a bourdonnement. On supprime les réflexions en couvrant les murs de draperies, substances non élastiques *qui éteignent les vibrations.*

392. Réfraction du son. — A la surface de séparation de

deux milieux inégalement élastiques, un mouvement sonore se décompose comme un mouvement lumineux, en deux parties : l'une revient dans le premier milieu en *se réfléchissant;* l'autre pénètre dans le second milieu en *se réfractant.*

La réfraction du son se démontre au moyen d'une lentille creuse en collodion remplie d'un gaz plus dense que l'air, tel que l'acide carbonique. Une montre ayant été disposée sur l'axe de la lentille, on arme l'oreille d'un cornet acoustique qu'on promène *sur l'axe* de l'autre côté de la lentille, jusqu'à ce qu'on entende un son distinct. Le son cesse d'être entendu pour un petit déplacement du cornet.

QUALITÉS DU SON

393. Les sons se distinguent par trois caractères ou *qualités :* **intensité, hauteur, timbre.** Ces qualités correspondent aux éléments de toute vibration : **amplitude, nombre** et **forme.**

1° **Intensité.** — L'intensité fait dire d'un son qu'il est *fort* ou *faible.* On démontre théoriquement que l'intensité est *proportionnelle à la force vive acquise par le corps vibrant* (1). D'après l'expression de la force vive, $\frac{1}{2} mv^2$, l'intensité est proportionnelle à la *masse* vibrante, m, et au carré de l'*amplitude* des vibrations (la vitesse v est proportionnelle à l'amplitude). Lorsque le mouvement vibratoire n'est pas entretenu, l'amplitude décroît et l'intensité s'affaiblit graduellement.

L'intensité décroît avec la *densité* du milieu, car la masse agitée pendant la durée d'une vibration décroît avec la densité. Un coup de fusil tiré sur une montagne, où l'air est plus raréfié, donne lieu en effet à un son moins intense qu'en plaine ; l'intensité s'annule par une raréfaction extrême, et le son ne se propage pas dans le vide (**386**).

Loi du carré des distances. — Dans un milieu indéfini, le nombre des molécules ébranlées, à une distance r, est proportionnel à la surface $4\pi r^2$ d'une sphère qui a pour centre le corps sonore. La force vive A de la source étant uniformément répartie sur cette surface, un centimètre carré en reçoit une fraction $\frac{A}{4\pi r^2}$, *inversement proportionnelle au carré de la distance à la source.*

(1) Force vive moyenne de la masse agitée par le mouvement vibratoire pendant la durée d'une vibration.

Si la propagation a lieu suivant l'axe d'un cylindre, la force vive se communique à des masses égales dans les sections droites successives du cylindre, elle se maintient presque invariable à toute distance et l'intensité reste constante; de là vient l'usage des *tuyaux acoustiques* qui transmettent la parole à de grandes distances.

2° **Hauteur**. — La hauteur fait dire d'un son qu'il est *grave* ou *aigu;* la hauteur est représentée par la *fréquence* des vibrations ou le *nombre de vibrations* exécutées, en une seconde, par le corps sonore, quelle que soit sa nature. Deux sons de même hauteur ont le même nombre de vibrations. Pour un son aigu, le nombre est plus grand que pour un son grave.

La fréquence ne varie pas quand l'intensité du son s'affaiblit, c'est-à-dire quand l'amplitude des vibrations diminue. La durée d'une vibration étant indépendante de l'amplitude, les vibrations sonores sont *isochrones* comme les petites oscillations d'un pendule.

3° **Timbre**. — Le timbre fait distinguer deux sons de même intensité et de même hauteur rendus par deux instruments différents. Il est dû à la superposition de divers sons au son principal.

MESURE DU NOMBRE DE VIBRATIONS

Pour mesurer le nombre de vibrations, on emploie deux méthodes :

1° La **méthode acoustique** : on établit l'*unisson* entre le son étudié et une *sirène*, à son variable, dont on compte le nombre de vibrations. L'oreille apprécie assez exactement l'unisson.

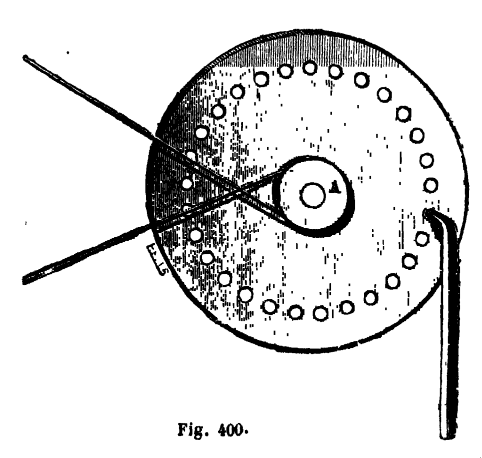


Fig. 400.

2° La **méthode graphique** : on fait tracer par le corps vibrant une *courbe* dont le nombre de *sinuosités*, en un temps connu, est égal au nombre de vibrations pendant ce temps.

394. Sirène. — Une sirène a pour organe principal un disque mobile autour d'un axe A perpendiculaire à son plan. Ce disque est percé d'orifices *équidistants* distribués sur une cir-

conférence qui a son centre sur l'axe de rotation (fig. 400). En face de ces orifices est fixé un tube communiquant avec une soufflerie (1) (fig. 401). Au moment où l'ouverture du tube coïncide avec un orifice du disque, le vent de la soufflerie traverse l'orifice et comprime l'air extérieur en le refoulant; presque aussitôt, par le mouvement du

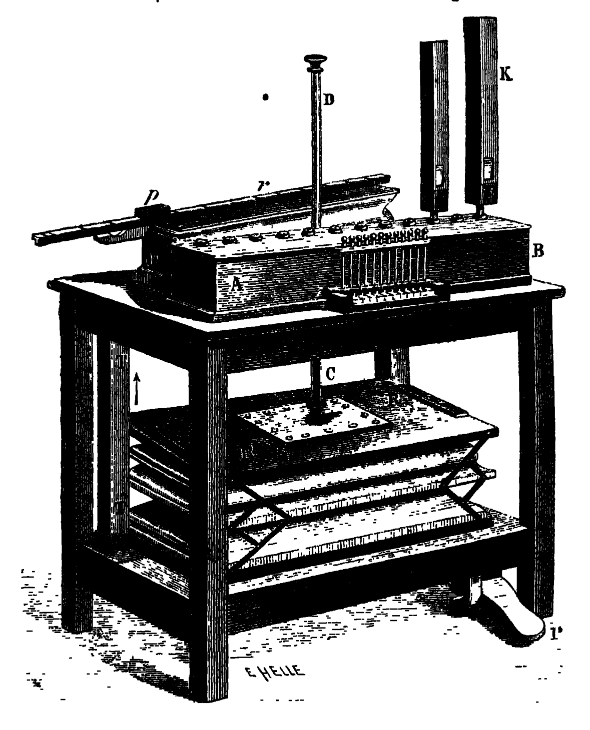


Fig. 401.

disque, une partie pleine intercepte le courant d'air; l'air extérieur, en vertu de son élasticité, revient en arrière en se dilatant. Ce double déplacement produit une vibration complète de l'air extérieur.

Si le disque mobile a 30 orifices, une nouvelle coïncidence de l'ouverture du tube et d'un orifice a lieu après une rotation de $\frac{1}{30}$ de

(1) Une *soufflerie* se compose d'un soufflet que l'on fait fonctionner au moyen d'une pédale P. L'air est poussé dans un réservoir R dont les parois latérales sont en peau très flexible et arrive, par un gros tuyau T, dans une caisse AB appelée *sommier*. La paroi supérieure du sommier est percée d'une rangée de trous destinés à recevoir des tuyaux. Ces trous sont fermés par des soupapes à ressort qu'on ouvre en pressant sur des touches. On peut accélérer la vitesse du vent en comprimant l'air du soufflet, ce qui se fait soit en chargeant de poids le réservoir du soufflet, soit en appuyant sur une tige CD qui sert à presser plus ou moins le réservoir.

circonférence; de là, une nouvelle sortie de l'air, suivie d'une nouvelle interruption. Pour une vitesse suffisante du disque, les vibrations se fondent en un son dont la hauteur croît avec la vitesse. Avec *n* tours du disque par seconde, le son de la sirène correspond à 30 *n* vibrations complètes.

Pour déterminer la hauteur d'un son, on fait varier la vitesse de rotation jusqu'à ce que le son rendu par le disque soit à l'*unisson* du son étudié. On *maintient alors constante la vitesse* de rotation, et on *compte le nombre de tours* du disque par seconde.

Cette sirène ne produit que des sons faibles. Si, au lieu d'un seul tuyau d'échappement de l'air de la soufflerie, on dispose un tuyau en face de chacun des orifices, le courant d'air traverse *simultanément* tous les orifices et les sorties sont également interceptées à la fois; les 30 ouvertures vibrent à l'unisson. Le nombre des vibrations est *le même qu'avec un seul tuyau,* mais l'intensité du son est notablement augmentée.

395. Méthode graphique. — La méthode graphique, où le corps vibrant *inscrit lui-même son mouvement,* est la plus précise.

Sur la surface d'un cylindre C (fig. 402), on a collé une feuille de

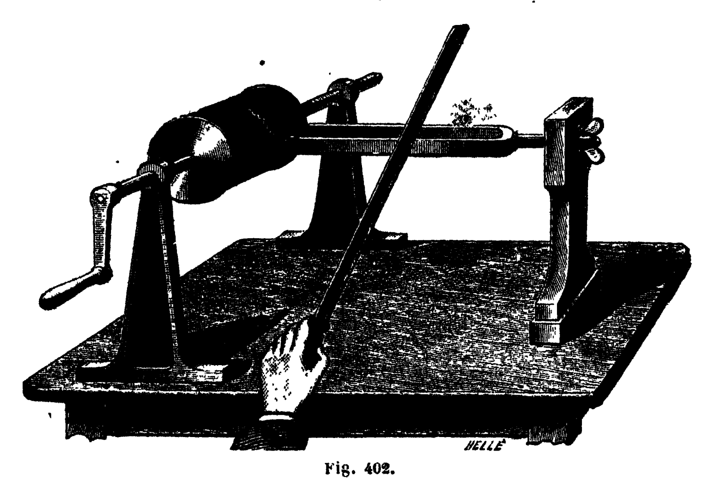


Fig. 402.

papier que l'on recouvre extérieurement d'une couche non adhérente de noir de fumée. Au corps sonore D on a fixé une pointe fine ou *style,* assez légère pour ne pas modifier la vibration; on approche le style de la surface du cylindre. En tournant, le cylindre, dont l'axe est fileté, s'avance parallèlement à son axe dans un écrou fixe E. Si le cylindre tourne sans que le corps sonore vibre, le style trace une hélice sur la surface couverte de noir; lorsque le corps sonore vient à vibrer

et oscille *parallèlement à l'axe du cylindre,* l'hélice est *ondulée* et chacune des sinuosités correspond à une vibration double. En un temps donné, le nombre des sinuosités croît avec la hauteur du son.

Dans la courbe tracée par le corps vibrant, les *abscisses* sont les temps comptés sur une circonférence perpendiculaire à l'axe du cylindre ; les *ordonnées,* parallèles à l'axe du cylindre, sont les excursions du style de part et d'autre de sa position moyenne. Le tracé de la pointe du style réunit les extrémités des ordonnées.

Habituellement, on emploie des *cylindres enregistreurs* (fig. 403),

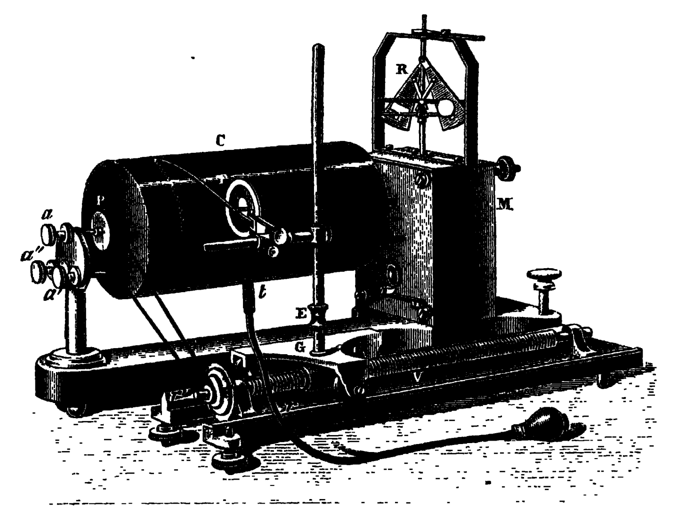


Fig. 403.

entraînés par un mouvement d'horlogerie. La vitesse de rotation est rendue uniforme par la résistance qu'oppose à l'air un régulateur à ailettes R. Ces cylindres n'ont pas de déplacement suivant leur axe. Pour éviter la superposition des tracés, le corps vibrant est porté par un chariot G qui sert d'écrou à une vis V parallèle à l'axe du cylindre. Par l'intermédiaire d'une corde enroulée sur deux poulies en regard P et P′, la vis tourne en même temps que le cylindre et fait avancer le chariot.

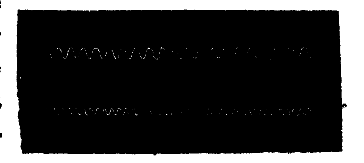


Fig. 404.

Pour n'avoir pas à connaître la vitesse de rotation du cylindre, on fait vibrer à la fois le corps sonore étudié et un diapason dont l'une des branches est également munie d'un style. Les deux styles

tracent sur le cylindre *deux lignes sinueuses parallèles* dont on compte les sinuosités après avoir déroulé le papier enfumé (fig. 404). *Le rapport des nombres de vibrations* des deux corps sonores, pendant un même temps, *est le quotient du nombre de leurs sinuosités comprises entre deux génératrices du cylindre.* Le nombre des vibrations du diapason, s'il est connu, permet de calculer le nombre absolu des vibrations de l'autre corps sonore.

Soit un diapason de comparaison exécutant 435 vibrations doubles par seconde. Si, entre deux génératrices du cylindre, le diapason a tracé 70 sinuosités et l'autre corps sonore 98, le nombre n des vibrations doubles de ce dernier, par seconde, est donné par la proportion

$$\frac{}{435} = \frac{98}{70}$$

Le procédé graphique s'applique à tous les cas.

Limite des sons perceptibles. — Un mouvement vibratoire sonore n'est perçu qu'entre certaines limites, qui correspondent généralement à 8 et 24 000 vibrations doubles par seconde. Les sons usités en musique ne dépassent guère 4 000 vibrations doubles. Les sons perceptibles embrassent 11 octaves, les sons musicaux 8.

396. Généralisation de la méthode graphique. — La méthode graphique a servi précédemment à la vérification des *lois de la chute des corps* avec l'appareil Morin, à l'inscription continue des *variations barométriques* avec l'enregistreur Richard, avec l'indicateur de Watt à l'inscription des *pressions* dans le cylindre d'une machine thermique ; elle est appliquée ici à l'observation du nombre, de l'amplitude et de la forme des *vibrations d'un corps élastique ;* elle constitue l'un des procédés d'exploration les plus précieux de la science expérimentale. Elle permet de suivre, *d'une façon ininterrompue*, des changements rapides ou faibles qu'un observateur ne pourrait saisir que par intermittences.

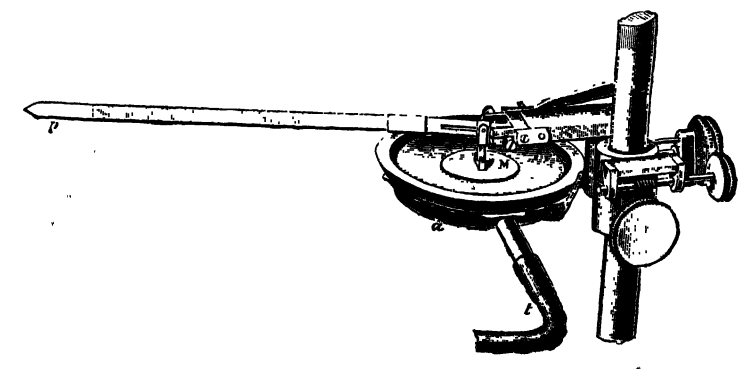


Fig. 405.

La plupart des phénomènes *physiologiques* étant des phénomènes de mouvement mécanique, leur étude se prête à un enregistrement graphique, obtenu en utilisant une faible partie du travail produit par le phénomène lui-même. La transmission du mouvement au style inscripteur se fait par des ressorts, par des liquides et très souvent par l'air. Dans ce dernier cas, un organe très employé pour l'enregistrement est le **tambour à levier** de Marey (fig. 405).

Il consiste en une capsule métallique ou tambour, dont l'ouverture est fermée par une mince membrane de caoutchouc. Au centre de cette membrane est fixée, en M, une rondelle d'aluminium qui commande un levier porte-style (du type des leviers du 3ᵉ genre). Ce levier est articulé dans une pièce métallique, il prend les mouvements de la membrane et les amplifie. Le style se déplace sur la surface enfumée d'un cylindre enregistreur (fig. 403). La caisse du tambour contient de l'air et la membrane se bombe quand la force élastique de cet air augmente. L'air de la caisse communique par un tube *t* avec un transmetteur dont la base, en caoutchouc, est pressée par l'appareil dont on étudie le déplacement; le transmetteur varie de forme suivant qu'il s'agit des pulsations du cœur, du pouls, du mouvement respiratoire, des mouvements de la locomotion ou de tout autre phénomène.

Chronographe inscripteur. — Avec un *chronomètre*, on ne peut apprécier que $0^s,2$; avec des chronographes à cylindres enregistreurs, on évalue $0^s,01$ et même $0^s,001$.

1° Supposons qu'il s'agit d'obtenir la durée d'un mouvement physiologique transmis à un *tambour à levier* de Marey et dont la courbe *a*S*b* est tracée (fig. 406).

Si la rotation du cylindre est uniforme, la longueur de l'arc compris entre les deux génératrices extrêmes fournit la durée du phénomène.

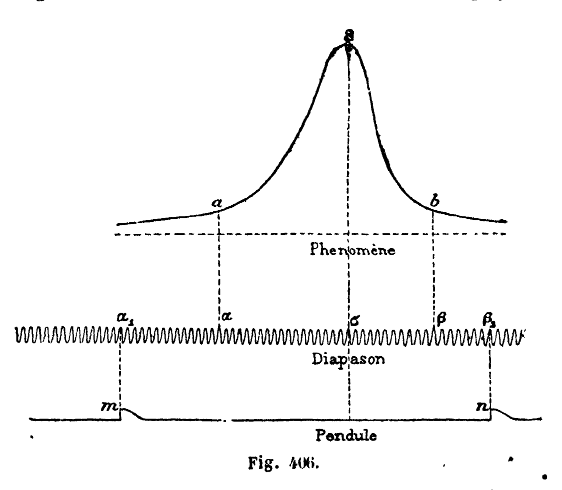


Fig. 406.

Diapason. — Habituellement, on détermine le temps en inscrivant, en même temps que la courbe du phénomène, les vibrations d'un *diapason étalonné* entretenu électriquement. Si l'on compte 29 sinuosités de la courbe ondulée du style du diapason entre les deux génératrices extrêmes $a\alpha$ et $b\beta$ et si le diapason exécute 100 vibrations par seconde, la durée $\alpha\beta$ du phénomène de *a* en *b* sera $0^{sec},29$.

Pendule. — Pour contrôler le nombre de vibrations du diapason, on établit toutes les demi-secondes, à l'aide d'un *pendule* d'horloge, un con-

tact qui ferme le circuit d'un *signal électrique* et détermine sur le cylindre un pointage en *m* et en *n*.

Un *signal électrique* consiste en un électro-aimant B qui peut attirer un contact de fer doux très léger *c* (fig. 407); le fer doux est mobile autour d'un axe *a* qui porte un style *s*. Quand il ne passe pas de courant dans l'électro-aimant, le fer doux est maintenu écarté par un ressort antagoniste R, et le style marque un trait rectiligne sur le papier enfumé du cylindre. Au moment où un courant passe, ce qui a lieu à chaque demi-seconde, le style inscrit un cran dû au déplacement du contact de fer doux. Le nombre de vibrations du diapason par demi-seconde est le nombre des sinuosités comprises entre deux crans consécutifs, *m* et *n*, du pendule.

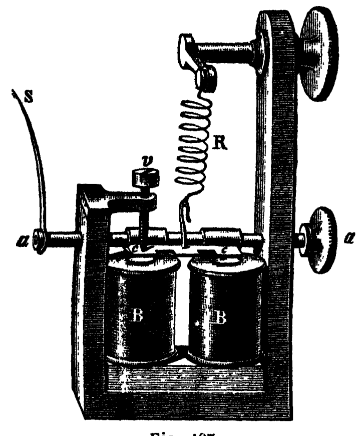


Fig. 407.

2° Lorsque le phénomène dont on cherche la durée n'agit pas sur un tambour à levier, on fait en sorte que le début du phénomène ferme automatiquement le circuit d'un signal électrique qui lui est spécial, ce qui inscrit un cran sur le tracé rectiligne du style. La fin du phénomène, en fermant de nouveau le circuit, provoque un second cran.

En résumé, trois styles distincts appuient sur le cylindre enfumé; leurs tracés se font les uns au-dessus des autres.

La mesure de la vitesse du son par Regnault a donné un exemple d'une évaluation précise d'un temps par un chronographe (fig. 394) (1).

SONS MUSICAUX

397. Intervalle de deux sons. — L'audition simultanée ou successive de deux sons produit sur notre oreille une impression qui ne dépend pas de leur hauteur absolue, mais de leur **intervalle**.

Si l'on considère quatre sons, tels que l'intervalle de A à B soit *jugé à l'oreille* égal à l'intervalle de A′ à B′, on constate en mesurant les nombres de vibrations par seconde *a* et *b*, *a′* et *b′*, que le rapport

(1) Le général Morin employait une méthode chronographique en faisant tourner son cylindre avec un mouvement d'horlogerie. S'il fallait une seconde pour un tour et si la surface du cylindre portait 100 génératrices équidistantes, le crayon mettait 0sec,01 à passer de l'une à l'autre. On obtenait exactement la hauteur de chute entre deux génératrices (fig. 76).

$\frac{a}{b}$ est égal au rapport $\frac{a'}{b'}$ (1). Pour cette raison, on appelle en acoustique, *intervalle de deux sons le rapport des nombres de vibrations par seconde* de ces deux sons. L'usage a prévalu de prendre pour numérateur le nombre de vibrations du son le plus aigu; un intervalle est donc toujours exprimé par un nombre supérieur à l'unité.

Notre oreille n'accepte volontiers des sons successifs ou simultanés que si leurs intervalles sont des rapports simples. Pour cela, on ne passe pas en musique d'un son à un autre par les intermédiaires; les sons employés forment des séries où n'entrent que des intervalles spéciaux.

Le musicien reconnaît les intervalles à l'audition, le physicien les précise en donnant les rapports des nombres de vibrations.

398. Accords. — L'émission simultanée de deux ou plusieurs sons séparés par des intervalles musicaux donne un *accord.*

L'accord est *consonant* s'il produit une sensation agréable à l'oreille, il est *dissonant* si la sensation est désagréable. Les intervalles consonants sont en petit nombre; l'intervalle le plus consonant est l'**unisson** $\frac{1}{1}$; puis viennent les intervalles : d'**octave** $\frac{2}{1}$, de *quinte* $\frac{3}{2}$, de *quarte* $\frac{4}{3}$, de *tierce majeure* $\frac{5}{4}$, de *tierce mineure* $\frac{6}{5}$.

Les nombres de vibrations de deux sons formant un accord harmonieux sont entre eux comme des *nombres entiers très petits.*

Accord parfait. — La production de trois sons dont les deux derniers présentent avec le premier des intervalles de tierce majeure et de quinte donne un accord dit *parfait majeur.*

GAMME

399. Si nous produisons successivement, à partir d'un premier son plus grave appelé ***tonique***, 6 autres sons qui se succèdent en présentant avec le premier les intervalles $\frac{9}{8}, \frac{5}{4}, \frac{4}{3}, \frac{3}{2}, \frac{5}{3}, \frac{15}{8}$,

Nombre de vibrations $1 \; \frac{5}{4} \; \frac{3}{2}$ ou $4 \; 5 \; 6$,

nous obtenons 7 sons formant une mélodie (2) type appelée *gamme.*

(1) Sans que les différences $a - b$ et $a' - b'$ interviennent.

(2) Dans la *mélodie* les sons sont successifs, dans l'*harmonie* ils sont simultanés.

Le nombre des vibrations du premier son est arbitraire, l'impression spéciale que détermine la gamme n'en dépend pas.

Notes. — Les signes des sons ou *notes* de la gamme ont reçu des noms particuliers. Voici les noms adoptés en France, avec les ntervalles de chaque note à la première (1)

ut	*ré*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*	*si*	*ut₂*
1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2

A la suite d'une première gamme de 7 notes, on peut former une nouvelle gamme dont les sons ont entre eux les mêmes intervalles que dans la première; le point de départ de la nouvelle série est appelé ut_2; l'intervalle de ut_2 à l'*ut* précédent est 2, on le nomme octave; on a ainsi : ut_2 $ré_2$ mi_2 fa_2 sol_2 la_2 si_2 ut_3; après cette série, on en forme une autre commençant par ut_3, dont l'intervalle avec ut_2 est 2, et ainsi de suite.

400. Diapason normal. — Comme il importe de s'entendre sur les nombres de vibrations des diverses notes, on a fixé le nom d'*une* note de hauteur déterminée.

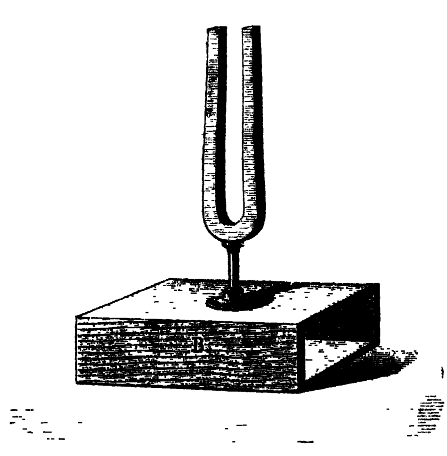


Fig. 408.

Le son d'un diapason type ou *normal* (fig. 408) faisant 435 vibrations doubles par seconde à 15°, est *par convention* (2) un *la*. L'*ut* de la gamme dont ce *la* fait partie a 261 vibrations doubles $\left(435.\frac{3}{5}\right)$.

401. Échelle musicale. — La gamme à laquelle appartient le *la* normal est dite *gamme fondamentale;* on affecte ses notes de l'indice₃ inscrit à droite et au-dessous de la note : ut_3 $ré_3$... la_3 si_3.

Les gammes plus aiguës ont les indices 4, 5, 6..., les gammes plus graves les indices 2, 1, — 1, — 2... Une gamme peut être comparée à une échelle à échelons irrégulièrement espacés.

(1) Les intervalles de *ut* aux notes suivantes ont des noms; *ut-ré* s'appelle seconde, *ut-mi* tierce, *ut-fa* quarte, *ut-sol* quinte, *ut-la* sixte, *ut-si* septième, *ut-ut₂* octave.

(2) Décision d'un Congrès réuni à Vienne en 1885.

L'échelle musicale tout entière comprend environ 8 octaves depuis ut_{-2}, son le plus grave, donné par le plus grand tuyau d'orgue et correspondant à 16,31 vibrations (1), jusqu'à $ré_7$. Les pianos vont du la_{-2} à l'ut_7. L'étendue d'une voix dépasse rarement deux octaves.

L'ensemble des sons de l'échelle musicale sera ut_{-2}...; ut_{-1}...; ut_1....; ut_2....; ut_3....; ut_4....; ut_5....; ut_6....; ut_7. En partant de 261 pour ut_3, les nombres de vibrations des ut des gammes successives sont :

$$ut_{-2}\ \frac{261}{2^4} = 16{,}31\ ;\quad ut_{-1}\ \frac{261}{2^3} = 32{,}52\ ;\quad ut_1\ \frac{261}{2^2} = 65{,}25$$

$$ut_2\ \frac{261}{2} = 130{,}5\ ;\quad ut_3\ 261\ ;\quad ut_4\ 261\,.\,2 = 522$$

$$ut_5\ 261.2^2 = 1044\ ;\quad ut_6\ 261.2^3 = 2088\ ;\quad ut_7\ 261\,.\,2^4 = 4176$$

Avec ces nombres et les intervalles connus, on calcule le nombre de vibrations d'un son musical quelconque.

Intervalles successifs dans une gamme. Tons et demi-tons. — Écrivons pour une gamme, les intervalles entre une note quelconque et la première, et plaçons sur une seconde ligne les intervalles calculés entre deux notes consécutives,

ut	*ré*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*	*si*	*ut*
1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2

$$\frac{9}{8}\quad \frac{10}{9}\quad \frac{16}{15}\quad \frac{9}{8}\quad \frac{10}{9}\quad \frac{9}{8}\quad \frac{16}{15}\ ;$$

les 7 intervalles consécutifs se réduisent à 3 : le plus grand $\frac{9}{8}$ est dit *ton majeur ;* $\frac{10}{9}$ *ton mineur ;* le plus petit $\frac{16}{15}$ *demi-ton majeur.*

On confond $\frac{9}{8}$ et $\frac{10}{9}$ parce que leur rapport $\frac{81}{80}$, appelé *comma,* est *pratiquement* considéré comme égal à l'unité et on donne le même nom de *ton* aux intervalles $\frac{9}{8}$ et $\frac{10}{9}$. L'intervalle $\frac{16}{15}$ est appelé un *demi-ton.* D'après cela, une gamme est constituée par la succession de *deux tons et un demi-ton, trois tons et un demi-ton,* ce que l'on peut représenter par 2T, *t*, 3T, *t*.

Dièzes, bémols. — L'échelle musicale se compose de *gammes naturelles,* ou gammes ayant une note *ut* pour *tonique* ou pour note la plus grave.

On doit souvent partir d'une autre note que *ut* comme tonique. Mais, si l'on part de *sol,* par exemple, la série des 7 notes qui sui-

(1) Autrefois, ut_{-2} correspondait à 16 vibrations, d'où 256 pour ut_3 et 426,666 pour la_3 ; la valeur actuelle de l'ut_{-2} provient de la valeur 435 attribuée au la_3.

vent présente des intervalles successifs qui ne sont pas distribués comme dans une gamme naturelle. On a en effet la série :

$$\begin{array}{cccccccc} sol_1 & la_1 & si_1 & ut_2 & ré_2 & mi_2 & fa_2 & sol_2 \\ & \frac{10}{9} & \frac{9}{8} & \frac{16}{15} & \frac{9}{8} & \frac{10}{9} & \frac{16}{15} & \frac{9}{8} \end{array}$$

ce qui donne 2T, *t*, 2T, *t*, T au lieu de 2T, *t*, 3T, *t*.

L'intervalle entre mi_2 et fa_2 est trop petit (un demi-ton au lieu d'un ton) et l'intervalle entre fa_2 et sol_2 est trop grand (un ton au lieu d'un demi-ton). Multiplions le nombre de vibrations de fa_2 par $\frac{25}{24}$, et appelons la nouvelle note fa_2 *dièze* ou $fa\sharp_2$, le rapport de $fa\sharp_2$ à mi_2 est $\frac{16}{15} \cdot \frac{25}{24} = \frac{10}{9}$, ou un ton; le rapport de sol_2 à $fa\sharp_2$ est $\frac{10}{9} : \frac{25}{24} = \frac{16}{15}$, ou un demi-ton.

On prend alors pour gamme, avec *sol* pour tonique, la suite :

$$sol_1\ la_1\ si_1\ ut_2\ ré_2\ mi_2\ fa\sharp_2\ sol_2.$$

Diézer une note, c'est la hausser d'un demi-ton en multipliant son nombre de vibrations par $\frac{25}{24}$.

Dans certains cas, il faut baisser une note d'un demi-ton ou la *bémoliser;* on le fait en multipliant le nombre de ses vibrations par $\frac{24}{25}$. C'est ainsi qu'on forme une gamme avec *fa* pour tonique, en remplaçant *si* par *si bémol* ou *si* ♭.

La seule gamme dont les notes ne sont altérées par aucun *accident* (dièze ou bémol) est la gamme d'*ut*.

A la gamme d'*ut* correspond l'accord parfait : *ut, mi, sol.*

Chacune des autres gammes est caractérisée par un accord parfait; ainsi, pour la gamme de *sol*, nous aurons l'accord : *sol*, *si*, $ré_2$.

402. Gamme tempérée. — En diézant et bémolisant toutes les notes, on aurait pour une octave 21 notes : 7 naturelles, 7 diézées et 7 bémolisées. Toutes ces notes peuvent être exécutées par un instrument à son variable, tel que le violon ou la voix humaine; mais il n'est pas pratique de les conserver dans un instrument à *sons fixes*, vu le nombre excessif de touches qu'exigeraient plusieurs octaves.

Les musiciens ont adopté, pour les pianos et orgues, une gamme dite *tempérée*, comprenant 12 intervalles consécutifs égaux. Cet intervalle, dit *tempérament* ou demi-ton moyen, diffère peu du demi-ton.

Chaque ton de la gamme ordinaire est ainsi remplacé par un intervalle décomposable en deux demi-tons moyens.

Voici les treize notes de la gamme tempérée avec leurs intervalles :

ut $= 1$	*fa* ♯ ou *sol* ♭ $= (\sqrt[12]{2})^6$
ut ♯ ou *ré* ♭ $= \sqrt[12]{2}$	*sol* $= (\sqrt[12]{2})^7$
ré $= (\sqrt[12]{2})^2$	*sol* ♯ ou la ♭ $= (\sqrt[12]{2})^8$
ré ♯ ou *mi* ♭ $= (\sqrt[12]{2})^3$	*la* $= (\sqrt[12]{2})^9$
mi ou *fa* ♭ $= (\sqrt[12]{2})^4$	*la* ♯ ou *si* ♭ $= (\sqrt[12]{2})^{10}$
mi ♯ ou *fa* $= (\sqrt[12]{2})^5$	*si* ou ut_2 ♭ $= (\sqrt[12]{2})^{11}$
	si ♯ ou $ut_2 = (\sqrt[12]{2})^{12}$

L'intervalle de deux notes peut être ici un peu supérieur à un comma. L'intervalle d'octave est rigoureusement conservé : la tierce et la quinte ont sensiblement la même valeur que dans la gamme ordinaire.

403. Gammes mineures. — Outre les gammes ordinaires dites gammes majeures, on emploie des gammes mineures (1).

Une *gamme mineure* se compose aussi de 5 tons et de 2 demi-tons, mais autrement distribués que dans une gamme majeure.

Les intervalles successifs y sont : T, *t*, 2T, *t*, 2T.

Telle est la gamme formée de notes naturelles, avec *la* pour tonique :

$$la_1 \quad si_1 \quad ut_2 \quad ré_2 \quad mi_2 \quad fa_2 \quad sol_2 \quad la_2.$$
$$\frac{9}{8} \quad \frac{16}{15} \quad \frac{9}{8} \quad \frac{10}{9} \quad \frac{16}{15} \quad \frac{9}{8} \quad \frac{10}{9}$$

A cette gamme mineure correspond un **accord parfait mineur**, où la tierce mineure $\frac{6}{5}$ remplace la tierce majeure $\frac{5}{4}$; cet accord est $la_1 \ ut_2 \ mi_2$.

$$\text{Nombre de vibrations} \quad 1 \quad \frac{6}{5} \quad \frac{3}{2} \text{ ou } 10 \quad 12 \quad 15.$$

404. Harmoniques. — On nomme *harmoniques* des sons dont les nombres de vibrations sont entre eux comme la suite naturelle des nombres entiers 1, 2, 3, 4, 5, 6...

Les sons harmoniques ont en musique un rôle important. La superposition de deux de ces sons donne un accord d'autant plus consonant qu'ils sont plus bas dans la série. Les deux premiers ont un intervalle d'octave, le deuxième et le troisième un intervalle de quinte, le troisième et le quatrième un intervalle de quarte, le quatrième et le cinquième un intervalle de tierce majeure, le cinquième et le sixième un intervalle de tierce mineure. Certains de ces harmoniques appartiennent à l'échelle musicale.

Voici les notes qui correspondent aux harmoniques du son ut_1.

---

(1) Il y a eu et il y a encore des systèmes musicaux qui diffèrent du nôtre par la valeur des intervalles et par leurs combinaisons. Ils ont varié avec le temps et avec les civilisations. Le développement musical accroît le nombre des intervalles utilisés.

Nombres de vibrations	n	$2n$	$3n$	$4n$	$5n$	$6n$	$7n$	$8n$
	ut_1	ut_2	sol_2	ut_3	mi_3	sol_3		ut_4

l'harmonique 7 est compris entre la_3 et si_3, il est voisin de $si\flat_3$.

405. Influence du déplacement relatif sur la hauteur d'un son. — Quand un corps sonore s'approche d'un observateur, l'espace que ses vibrations ont à parcourir décroît graduellement; elles arrivent plus tôt à l'oreille que si le corps sonore était immobile et, en un temps donné, le nombre de vibrations reçues augmente; la hauteur du son paraît alors s'élever. Elle semble s'abaisser si le corps sonore s'éloigne.

Supposons que le corps sonore se meuve avec une vitesse s et l'observateur avec une vitesse a, dans une même direction et avec le même sens.

Représentons par S et A les positions respectives (1) du corps sonore et de l'observateur à un temps, pris pour temps zéro, où commence en S une 1re vibration du corps sonore (fig. 409). Le début de cette vibration se propage avec la vitesse V du son; au temps θ_1, elle atteint l'observateur qui a parcouru l'espace AA' pendant le temps θ_1.

$$\text{On a}\quad SA' = V\theta_1 = SA + AA' = SA + a\theta_1, \qquad \text{d'où}\quad \theta_1 = \frac{SA}{V-a}.$$

Si la période de vibration du corps sonore est T, S est venu en S' pendant le temps T, SS' $= sT$; le début de la 2e vibration part de S', parcourt $S'A'' = V\theta_2$ et atteint l'observateur en A'' au temps $T + \theta_2$.
D'après l'équation $S'A'' = V\theta_2 = SA - SS' + AA'' = SA - sT + a(T + \theta_2)$,

$$\text{on a}\quad \theta_2(V-a) = SA + T(a-s),$$

$$\text{d'où}\quad \theta_2 = \frac{SA}{V-a} + T\frac{a-s}{V-a}.$$

La *période apparente* T' est l'intervalle de temps qui sépare la réception par l'observateur du début de deux vibrations consécutives; elle est :

$$T' = T + \theta_2 - \theta_1 = T\left(1 + \frac{a-s}{V-a}\right) = T\frac{V-s}{V-a}$$

S S' A A' A''

Fig. 409.

La *hauteur apparente* du son est

$$n' = \frac{1}{T'} = \frac{1}{T}\cdot\frac{V-a}{V-s} = n\,\frac{V-a}{V-s}.$$

1° On a $n' > n$, si $V - a > V - s$, ou si $a < s$, pour a et s positifs.

2° L'observateur et le corps sonore se rapprochent : a est nég., s est pos.; $n' = n\,\dfrac{V+a}{V-s}$.

---

(1) Les positions S et A de la source sonore et de l'observateur sont quelconques, à l'origine du temps; V est la vitesse de propagation du son dans l'air à la température de l'expérience; les vibrations isochrones de la source sonore ont une période T. Les vitesses a et s sont comptées positivement dans le sens SA.

3° Observateur fixe : $a = 0$; le corps sonore s'approche, s est positif;

$$n' = n \frac{V}{V - s}, \text{ le son s'élève.}$$

4° Observateur fixe : $a = 0$; le corps sonore s'éloigne, s est négatif.

$$n' = n \frac{V}{V + s}, \text{ le son s'abaisse.}$$

Ces résultats ont été vérifiés sur les sons de sifflets de locomotives.

TUYAUX SONORES

406. Un *tuyau sonore* est un tube à parois résistantes et lisses qui rend un son quand on fait vibrer l'air qu'il renferme.

L'ébranlement de l'air est habituellement produit par une source sonore dont les formes se ramènent à deux types : l'embouchure de flûte et l'embouchure à anche.

Embouchure de flûte. — Dans l'embouchure qui est employée dans la flûte, le flageolet et la plupart des tuyaux d'orgue, l'air sort d'une soufflerie où il est comprimé, traverse un tube P appelé *pied* du tuyau et arrive dans une chambre à air qui n'est ouverte à son sommet que par une fente étroite *i* appelée *lumière*. Le courant d'air sort en *i*, vient frapper une lame *a*, ou *lèvre*, taillée en biseau, formant le bord supérieur d'une ouverture transversale B que l'on nomme *bouche* (fig. 410). Le courant d'air, en se brisant contre le biseau, produit une série d'impulsions qui se transmettent à la colonne d'air.

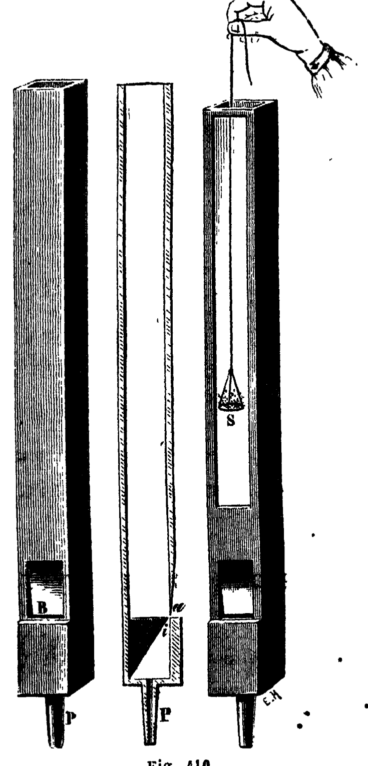


Fig. 410.

L'air vibre dans un tuyau sonore. — Dans un tuyau qui résonne et dont une des faces est fermée par une vitre, on fait descendre, à l'aide d'un cordon, une membrane S tendue sur un cadre et

couverte de sable (fig. 410). Le frémissement de la membrane et le sautillement du sable rendent manifeste l'état vibratoire de l'air.

Influence des parois. — Le corps sonore est l'air du tuyau. Les parois n'influent pas sur la hauteur du son. Pour le montrer, on dispose sur une soufflerie trois tuyaux de même longueur et de même diamètre, ayant des embouchures identiques : le premier en bois, le deuxième en cuivre, le troisième en carton épais. Les trois sons rendus sont de même hauteur, leur timbre seul diffère.

Influence de la nature du gaz. — La hauteur du son s'élève quand la densité du gaz diminue. Le son est plus aigu avec l'hydrogène qu'avec l'air; il est plus grave avec l'acide carbonique.

Un tuyau sonore se comporte comme un résonateur. — Un tuyau sonore agit en renforçant certains sons. Pour le montrer, on fait vibrer un diapason D au-dessus d'une éprouvette à pied V contenant de l'eau (fig. 411). On *renforce* notablement le son du diapason en versant de l'eau dans l'éprouvette pour donner à la colonne d'air une *longueur convenable*. Avec un diapason d'un autre son le renforcement a lieu en modifiant la longueur de la colonne d'air.

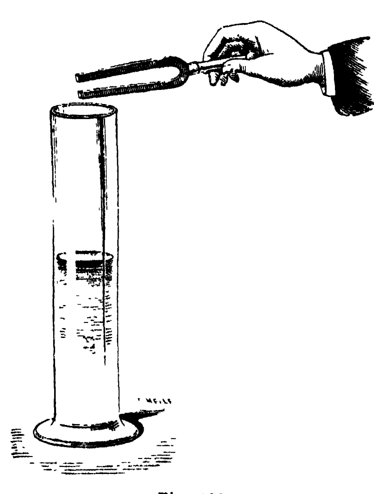


Fig. 411.

Le tuyau étant planté sur une soufflerie, si l'on accélère graduellement la vitesse du vent, les sons successifs et de hauteur croissante, rendus par l'embouchure sont très faibles; le tuyau *renforce* considérablement certains d'entre eux, à l'exclusion des intermédiaires.

LOIS DES TUYAUX CYLINDRIQUES OU PRISMATIQUES

407. Avec des tuyaux cylindriques ou prismatiques dont le *diamètre est très petit par rapport à la longueur*, la hauteur des sons rendus ne dépend que de la longueur et ne dépend pas du diamètre. Un tuyau droit et un tuyau coudé rendent les mêmes sons s'ils sont de même longueur. Les sons renforcés diffèrent suivant que l'extrémité opposée à l'embouchure du tuyau est *fermée* ou *ouverte*.

Lois des harmoniques. — **Tuyaux fermés.** — Les hauteurs des sons rendus sont n, $3n$, $5n$, $7n$..... Le son le plus grave est appelé **son fondamental.** Les autres sons renforcés sont les *harmoniques impairs* du son fondamental.

Tuyaux ouverts. — Les nombres de vibrations des sons renforcés sont n', $2n'$, $3n'$..... Les sons renforcés sont un *son fondamental* et ses *harmoniques successifs.*

Loi des longueurs. — 1° *La hauteur du son fondamental*, pour des tuyaux *de même espèce* (soit fermés, soit ouverts), *est en raison inverse de la longueur du tuyau.* Ainsi, on fait monter d'une octave le son d'un tuyau en le raccourcissant de moitié.

2° *Un tuyau fermé donne le même son fondamental qu'un tuyau ouvert de longueur double.* On démontre cette loi en montant sur une soufflerie un tuyau ouvert traversé en son milieu par une coulisse N dont l'une des moitiés est pleine et l'autre évidée (fig. 412). Si l'on fait rendre au tuyau ouvert le son le plus grave qui lui est propre, la hauteur du son ne change pas, lorsqu'en tirant la coulisse, on substitue la partie pleine à la partie évidée; on a remplacé le tuyau ouvert par un tuyau fermé de longueur moitié moindre. — Le son le plus grave d'un tuyau ouvert est l'octave aiguë du son fondamental du tuyau fermé de *même longueur.* Cette remarque permet de réunir dans un énoncé unique les lois des harmoniques pour un tuyau ouvert et un tuyau fermé de même longueur.



Fig. 412.

Série complète des harmoniques. — Soit n le nombre des vibrations du *son fondamental* ou du *premier harmonique* d'un tuyau fermé, ce tuyau renforce les sons n, $3n$, $5n$, $7n$.....; le tuyau ouvert de même longueur renforce les sons $2n$, $4n$, $6n$... Les deux tuyaux fournissent donc la *série complète des harmoniques du son fondamental du tuyau fermé;* le tuyau fermé renforce les harmoniques impairs et le tuyau ouvert les harmoniques pairs.

Nœuds et ventres fixes. — *Tuyau ouvert.* — 1° Dans un tuyau ouvert rendant *le son le plus grave* ($2n$), faisons descendre la membrane couverte de sable qui a servi à vérifier l'état vibratoire de la colonne d'air (fig. 410), le sable est partout agité, sauf au milieu N. Cette tranche de *mouvement nul* est appelée **nœud.** On pousse en ce point une coulisse pleine (fig. 412) qui divise le tuyau en deux parties égales, la hauteur du son rendu n'est pas changée. Les deux segments égaux NV et NV' du tuyau

ouvert *vibraient à l'unisson.* 2° Lorsque le même tuyau ouvert rend son *deuxième harmonique* ($4n$), on peut isoler par une coulisse le premier ou le dernier quart du tuyau sans changer la hauteur; les tranches N_1 et N_2 sont des nœuds (fig. 413). La hauteur du son changerait si l'on faisait une ouverture en un nœud.

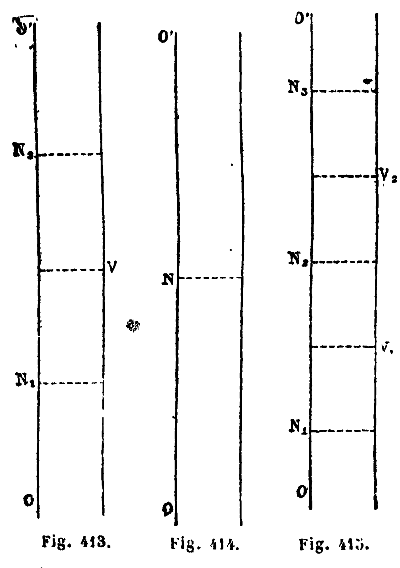


Fig. 413. Fig. 414. Fig. 415.

Au milieu de l'intervalle N_1 N_2, le *mouvement* du sable est *maximum* : cette tranche est appelée **ventre**. On peut y pratiquer une ouverture sans changer la hauteur. Au milieu V du tuyau on peut ouvrir ou fermer un opercule sans que le son change. La force élastique sur la tranche V est donc égale *à la pression atmosphérique.* Le tuyau peut d'ailleurs être considéré comme formé de deux tuyaux ouverts réunis en V et vibrant à l'unisson. On le vérifie en prenant un tuyau ouvert composé de deux tronçons d'égale longueur ajustés l'un sur l'autre (fig. 417); si l'on fait rendre à ce tuyau son deuxième harmonique, le son conserve sa hauteur quand on supprime le tronçon supérieur; les deux tronçons vibraient donc isolément et à l'unisson.

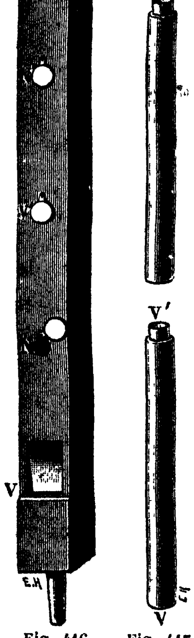


Fig. 416. Fig. 417.

Chacun des deux tronçons OV et VO′ (fig. 413) vibre comme un tuyau ouvert et présente en son milieu un nœud; la colonne d'air est donc subdivisée en 4 segments vibrant à l'unisson : ON_1, N_1V, VN_2, N_2O'.

Les extrémités d'un tuyau ouvert communiquent avec l'atmosphère et sont des ventres.

Tuyau fermé. — Dans un tuyau fermé, on ne trouve pour le *son fondamental* ni nœud ni ventre à l'intérieur du tuyau; le fond du tuyau est un nœud, puisque la tranche qui touche le fond ne peut se déplacer; l'orifice est un ventre, car il est à la pression atmosphérique.

D'après la répartition des nœuds et des ventres, la colonne vibrante présente *trois subdivisions* pour le deuxième harmonique, *cinq* pour l'harmonique suivant, etc.

Répartition générale des nœuds et des ventres. — ***En résumé,*** les nœuds et les ventres sont *fixes* pour un même son rendu; ils sont *équidistants* et *alternent,* deux nœuds consécutifs étant toujours séparés par un ventre. La répartition est telle qu'un fond solide est un nœud

et que les extrémités ouvertes sont des ventres. *Les nœuds et les ventres subdivisent la colonne gazeuse d'un tuyau sonore en segments vibrant à l'unisson.* En considérant à la fois un tuyau fermé et le tuyau ouvert de même longueur, le nombre des segments est, pour chaque harmonique, précisément égal au numéro d'ordre de cet harmonique (1 pour le son fondamental du tuyau fermé, 2 pour l'harmonique 2; 3 pour l'harmonique 3; 4 pour l'harmonique 4, etc...).

Étude des nœuds et des ventres par les flammes. — L'emploi des *tuyaux à flammes manométriques* montre que les *nœuds sont le siège de compressions et de dilatations alternatives.* Une portion de la paroi du tuyau est remplacée par une membrane élastique *m* sur laquelle est appliquée une *capsule* ou boîte cylindrique aplatie que traverse un courant de gaz d'éclairage (fig. 418). Deux ajutages sont adaptés à la capsule, l'un *a* sert à l'arrivée du gaz, l'autre porte un bec B où l'on allume

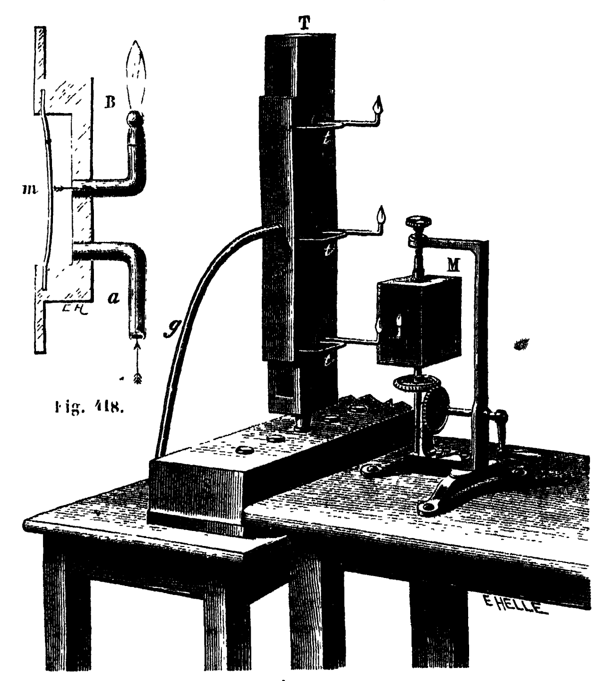


Fig. 418.

Fig. 419.

le gaz sortant. Un accroissement de pression dans le tube agit sur la membrane, comprime le gaz et allonge la flamme ; la membrane rentre par une diminution de pression et la flamme se raccourcit.

Aux ventres, la pression du gaz ne variant pas, la flamme est immobile. *Aux nœuds,* les compressions et les dilatations alternatives du gaz intérieur provoquent, à de très courts intervalles, des allongements et des raccourcissements de la flamme, qui se superposent à la vue : on les sépare en regardant l'image de la flamme dans un miroir

tournant (fig. 419). Aux ventres on voit une bande lumineuse de hauteur uniforme; elle est dentelée (1) aux nœuds (fig. 420).

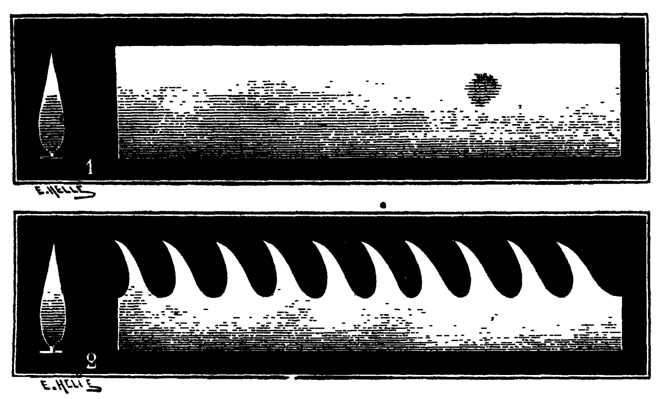


Fig. 420.

Tuyaux à anche. — Dans un tuyau, les sorties périodiques du courant d'air peuvent avoir lieu par les vibrations d'une lame élastique, ou anche. Le tuyau renforce un des sons de cette lame.

Dans les tuyaux d'orgue, l'anche est placée à la partie supérieure du tuyau. Le tuyau, fixé par son pied sur une soufflerie, est fermé en haut par un couvercle en bois qui plonge par une boîte creuse dans l'intérieur du tuyau (fig. 421).

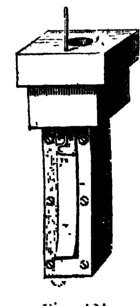


Fig. 421.

Anche libre. — Le prolongement creux du couvercle est percé latéralement d'une fente F rectangulaire, allongée, à l'intérieur de laquelle est mobile, une mince lame de laiton *l*, attachée par son extrémité supérieure à l'un des petits côtés de l'ouverture; c'est l'anche libre. L'air de la soufflerie arrive par le tuyau, pousse la lame *l* en dedans de la boîte et s'échappe par l'orifice O du couvercle; par son élasticité, la lame revient à sa position d'équilibre, la dépasse et vibre transversalement. Le nombre d'ouvertures et de fermetures de la fente est le nombre de vibrations de la lame élastique.

Anche battante (fig. 422). — La lame élastique *l* qui constitue l'an-

(1) Les nœuds et les ventres peuvent être manifestés d'une façon plus simple, mais moins complète, avec un long tuyau cylindrique, fermé à un bout par une paroi solide et à l'autre bout par une membrane élastique. Dans le tuyau, qui est percé sur une génératrice de petits trous équidistants, on fait passer, par deux tubulures, un courant de gaz d'éclairage. En allumant le gaz et en le réglant, on obtient une rampe de *petites* flammes égales. Si l'on fait vibrer un diapason devant la membrane, les flammes restent petites aux ventres, elles prennent une hauteur maximum aux nœuds.

che battante est un peu plus large que la fente et bat ses bords en vibrant. Elle ferme, comme une cloison, une rigole *c*, dans laquelle l'air ne pénètre pour s'échapper, qu'en soulevant la lame élastique.

Avec les deux espèces d'anches, on rend le son plus aigu en diminuant la longueur de la partie libre, qui est la partie vibrante. Pour cela une petite tige de métal *r* appelée *rasette*, passe à frottement dur à travers le couvercle, et peut être descendue à volonté; par sa partie recourbée inférieure, la rasette s'appuie sur l'anche.

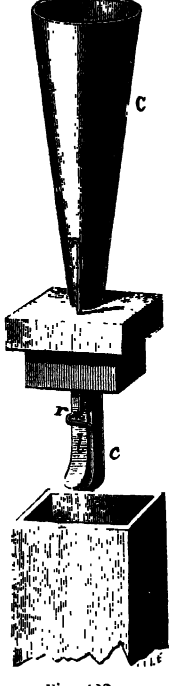


Fig. 422.

Instruments à vent. — Ce sont généralement des tuyaux droits ou courbés où l'air vibre dans le sens de la longueur. Le *flageolet*, la *flûte*, le *cornet à piston* sont à embouchure de flûte; la *clarinette*, le *hautbois* sont des instruments à anche.

Dans les *orgues* on n'utilise que le son le plus grave : chaque note exige un tuyau.

Dans la *flûte*, si les trous sont bouchés, on obtient le son le plus grave et ses harmoniques, comme dans un tuyau ouvert de longueur égale à celle de l'instrument; mais, en ouvrant un des trous latéraux, on y fait naître un ventre comme si le tuyau était ouvert au point où l'ouverture est produite; cela permet d'obtenir des sons intermédiaires entre les harmoniques du tuyau.

Dans le *cornet à piston*, on fait varier la longueur du tuyau.

LOI DE SIMILITUDE

408. Lorsque, deux corps sonores, de même substance et *géométriquement semblables,* vibrent suivant le même mode, *leurs nombres de vibrations sont inversement proportionnels aux dimensions homologues.* Cette *loi s'applique aux corps sonores les plus divers :* plaques, timbres, cloches, tuyaux variés, semblables et embouchés semblablement, sphériques, prismatiques, etc.

Si l'on place sur une soufflerie deux tuyaux cubiques dont les arêtes sont dans le rapport de 2 à 1 (fig. 423); le son du petit tuyau B est à l'octave aiguë de celui du grand tuyau A. Avec des dimensions homologues dans le rapport de 3 à 2 (fig. 424), le petit tuyau fait 3 vibrations quand l'autre en fait 2.

Loi des longueurs des tuyaux. — La loi de similitude conduit à la loi des longueurs pour les tuyaux *longs et étroits.*

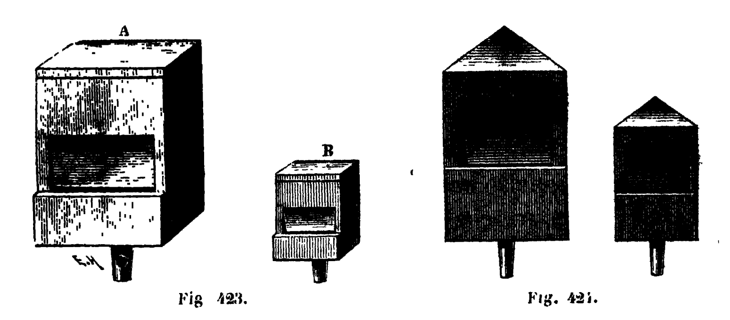


Fig 423. Fig. 424.

Soient, en effet, deux tuyaux de longueurs différentes contenant le même gaz : *on peut les supposer géométriquement semblables* puisque les dimensions transversales n'ont pas d'influence sur des tuyaux longs et étroits. Les longueurs l et l' sont donc des dimensions homologues, et on a : $\frac{n}{n'} = \frac{l'}{l}$.

VIBRATIONS DES CORPS SOLIDES

Au point de vue vibratoire, les corps solides élastiques peuvent être partagés en plusieurs groupes.

I. *Corps dont la longueur est grande par rapport à la largeur et à l'épaisseur :* 1° Tiges (rigides) ; 2° Cordes (flexibles).

II. *Corps de longueur et largeur comparables, mais d'épaisseur très petite :* 1° Plaques (rigides) ; 2° Membranes (flexibles).

III. *Corps de formes quelconques :* timbres, cloches, cymbales, tam-tams ; pour lesquels on ne connaît que la loi de similitude.

409. Vibrations longitudinales des tiges. — On fait vibrer une tige longitudinalement, en la frottant, suivant sa longueur, avec un morceau de drap saupoudré de colophane, ou imbibé d'eau acidulée s'il s'agit de tiges de verre. Comme pour un tuyau, la hauteur du son ne dépend pas de la section, lorsque cette section reste *très petite* par rapport à la longueur.

Une tige éprouve, en vibrant longitudinalement, un *allongement* égal à celui que produirait une forte traction. La répétition périodique de l'effort qui fait vibrer la tige peut amener sa rupture, en augmentant considérablement l'amplitude du déplacement

des molécules. Des cordes en fil de fer de *ponts suspendus* ont pu se rompre par le mouvement cadencé d'une troupe en marche.

Lois des vibrations longitudinales des tiges. — Ces lois sont celles des vibrations des tuyaux sonores. En effet, les phénomènes vibratoires produits dans une colonne ont pour cause l'élasticité de sa matière; la nature de la substance influe seulement sur la hauteur des sons rendus.

Une tige que l'on fait vibrer peut être *fixée à l'une des extrémités*, l'autre extrémité étant libre; ou *fixée par le milieu*, les deux extrémités étant libres; ou *fixée aux deux extrémités*.

Pour un mode de vibration déterminé, une même tige peut rendre différents sons. Elle se divise en *segments vibrant à l'unisson*, avec des nœuds et des ventres fixes répartis comme dans un tuyau sonore.

Pour une longueur donnée, le son le plus grave est rendu par une **tige fixée par un bout**, elle est assimilable à un *tuyau fermé;* l'extrémité fixée est un nœud. Le son le plus grave d'une tige de même substance et de même longueur, fixée par son milieu et libre à ses extrémités, est à l'octave aiguë du précédent; la tige se comporte alors comme un tuyau ouvert, le milieu fixé est un nœud (tranche immobile).

VIBRATIONS TRANSVERSALES DES CORDES

410. Une corde est un fil en boyau ou en métal, *fixé par ses deux extrémités et tendu;* si on la tire perpendiculairement à sa longueur pour l'abandonner ensuite, la corde oscille rapidement de part et d'autre de sa position rectiligne primitive. Ces vibrations, perpendiculaires à la longueur de la corde, sont dites **transversales.**

Lois. — Les lois des vibrations transversales des cordes sont comprises dans une formule établie théoriquement :

$$n = \frac{1}{2rl}\sqrt{\frac{Mg}{\pi D}},$$

n est le nombre de vibrations complètes effectuées en une seconde par une corde *vibrant dans toute sa longueur* et rendant ainsi le son le plus grave; M est le poids tenseur en grammes, Mg sa valeur en dynes, D densité de la corde, l sa longueur, r son rayon (l et r s'expriment en centimètres).

La fréquence des vibrations du son le plus grave varie ***en raison inverse** : de la longueur de la corde, de son diamètre, de la racine carrée de sa densité;* ***proportionnellement** à la racine carrée du poids tenseur.*

Vérifications expérimentales. — **Sonomètre.** — Les vérifications expérimentales se font à l'aide du sonomètre.

Le *sonomètre* est une longue caisse rectangulaire en bois de sapin destinée à renforcer les sons (fig. 425).

Sur la face supérieure de la caisse sont fixés deux chevalets triangulaires A et B, parallèles entre eux et distants de 1 mètre. Sur ces chevalets sont tendues deux cordes, attachées, chacune à l'une de ses extrémités en H et en H'; à l'autre extrémité, l'une des cordes *m* in-

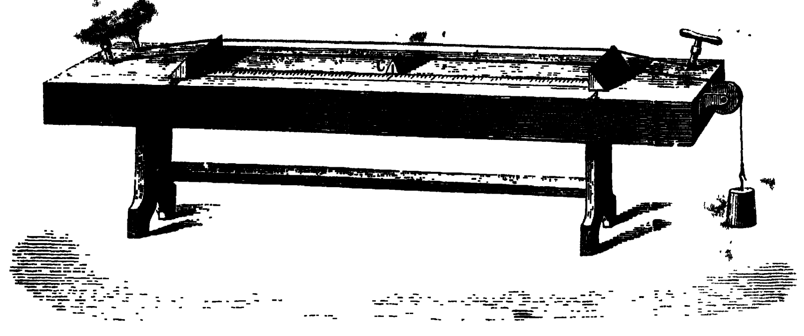


Fig. 425.

variable, s'enroule sur une cheville que l'on tourne avec une clef K pour modifier la tension; l'autre corde, *variable,* passe sur une poulie et supporte des poids tenseurs P. Entre les deux chevalets fixes, A et B, un chevalet mobile C peut glisser sous la corde variable, le long d'une règle divisée. On *limite la longueur vibrante* en appuyant la corde sur le chevalet mobile.

Une corde tendue est droite dans sa position d'équilibre ; on provoque ses vibrations transversales soit en la frappant, soit en la pinçant et l'écartant, soit en la frottant perpendiculairement à sa longueur avec un archet enduit de colophane.

Loi des longueurs. — Ayant réglé avec des poids la tension de la corde variable, on la fait vibrer dans sa totalité, puis on tend l'autre avec la clef K pour la mettre à l'unisson. La corde tendue avec la clef, conservera, pour la *comparaison*, le son qui a été rendu par la corde variable vibrant dans sa totalité.

On pousse le chevalet mobile au milieu de la corde variable; en faisant vibrer l'une de ses moitiés, on a l'octave aiguë du son de la corde entière.

On place le chevalet au tiers de la corde. En faisant vibrer les $\frac{2}{3}$, on a la quinte du son de la corde entière. En faisant vibrer le $\frac{1}{3}$, on a l'octave aiguë du son rendu par les $\frac{2}{3}$.

Longueurs de la corde :	1	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$;
Nombres de vibrations .	1	$\frac{3}{2}$	2	3;
Notes :	*ut*	*sol*	ut_2	sol_2.

On peut supprimer la corde de comparaison et *mesurer directement, avec la sirène,* le nombre absolu des vibrations de la corde variable. On peut encore fixer sur la corde variable un style très léger et *inscrire ses vibrations* sur un cylindre enregistreur. La vérification est ainsi effectuée avec des longueurs, des diamètres, des tensions et des densités quelconques (1).

D'après la loi des longueurs, le sonomètre peut donner la *fréquence* d'un son quelconque. Soit L la longueur d'une corde à l'unisson du diapason normal (435 vibrations) et l la longueur de la corde à l'unisson du son étudié (x vibrations) : $\frac{L}{l} = \frac{x}{435}$.

411. Instruments à cordes. — Dans les instruments *à sons fixes*, à chaque note correspond une corde. Dans le *piano*, on fait varier la longueur, le diamètre et même la nature des cordes pour obtenir les diverses notes. L'une des extrémités est enroulée sur une cheville que l'on tourne pour accorder l'instrument en modifiant la tension. Les vibrations sont produites par le choc de petits marteaux qu'on soulève par l'intermédiaire de *touches*.

Dans la harpe, on fait vibrer les cordes en les pinçant.

Le *violon,* instrument *à sons variables,* n'a que quatre cordes tendues avec des chevilles au-dessus d'une caisse sonore. L'artiste fait vibrer une corde en la frottant en travers avec l'archet, il limite la partie vibrante avec le doigt. Le son est d'autant plus aigu que la partie comprise entre le doigt et le chevalet est plus courte.

412. Vibrations transversales des tiges. — Des tiges élastiques peuvent vibrer transversalement. Après les avoir fixées, dans un étau, par une extrémité ou par le milieu, on les frotte sur l'épaisseur avec un archet.

Les tiges étant rigides tandis que les cordes sont flexibles, les lois sont différentes pour les tiges et pour les cordes.

Une même tige, fixée d'une façon déterminée, peut rendre différents sons et présenter des *nœuds* et des *ventres*.

---

(1) Les vérifications sont faites avec des cordes *longues, fines, flexibles* et *fortement tendues*. En effet, la formule qui résume les lois a été établie pour une corde de flexibilité parfaite; or, la raideur agit comme une tension constante qui n'est négligeable que si la tension expérimentale est considérable.

Si l'on fait vibrer une *tige plate*, recouverte sur sa face supérieure d'une légère couche de sable fin et sec, le sable sautille et se rassemble sur des *lignes nodales* perpendiculaires à la longueur.

Pour des *tiges prismatiques, semblablement assujetties*, la hauteur du son fondamental ne dépend pas de la largeur (dimension perpendiculaire au plan de vibration), elle est proportionnelle à l'épaisseur et en raison inverse du carré de la longueur : $n = k \frac{e}{l^2}$. Le son est d'autant plus aigu que la tige est plus épaisse et plus courte. Les lois sont les mêmes, que les lames soient courbes ou droites.

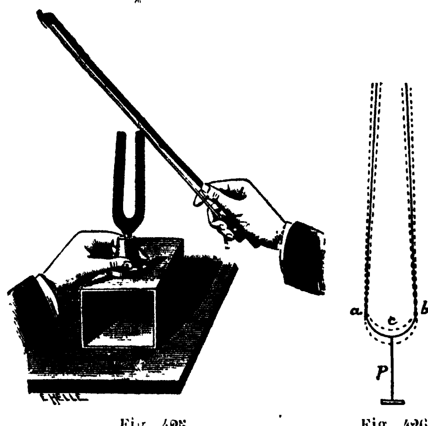


Fig. 425. Fig. 426.

413. Diapason. — Un diapason est une tige d'acier prismatique, à section rectangulaire, recourbée sur elle-même en forme de fourche ; les deux branches sont parallèles ou légèrement convergentes. On fait vibrer un diapason, en écartant brusquement les deux branches avec un petit cylindre de bois ou de métal, ou en frottant l'une des branches avec un archet. Les deux branches vibrent à l'unisson (fig. 425).

Le diapason présente en vibrant deux *nœuds a* et *b* voisins de la courbure ; le sommet *c* de la courbure est un *ventre* (fig. 426). La base de la fourche est prolongée par une tige verticale *p* qui sert à fixer l'instrument sur une *caisse de résonance* ouverte à l'une de ses extrémités.

Les diapasons à branches courtes et épaisses donnent des sons aigus ; on a des sons graves avec des branches longues et minces.

A température constante, *un diapason exécute des vibrations isochrones*. On l'emploie à la mesure très précise du temps. En munissant l'une des branches d'un style très léger, on lui fait inscrire ses vibrations sur un cylindre enregistreur.

Électro-diapason. — Pour une expérience prolongée, on entretient les vibrations du diapason avec un électro-aimant (fig. 427).

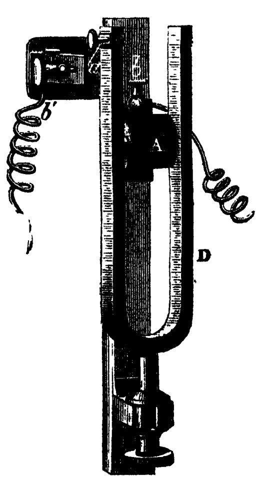


Fig. 427.

Le fil de l'électro-aimant se termine d'une part au diapason et, d'autre part, à une borne b à laquelle aboutit l'un des pôles d'une pile. Une branche du diapason porte un fil de platine a, dont le bout libre est voisin d'une lame de platine isolée, reliée à la pile par une borne b'.

Quand le diapason vibre, le fil a vient toucher la lame de platine et ferme le circuit de la pile, l'électro-aimant A s'aimante et attire les branches d'acier du diapason; le fil a s'éloigne alors de la lame de platine et ouvre le circuit, le circuit est de nouveau fermé au retour des branches du diapason. L'impulsion due à l'attraction de l'électro-aimant se reproduit à chaque oscillation et compense l'affaiblissement de l'amplitude.

Diapason normal. — Le diapason sert d'*étalon de hauteur musicale* pour accorder les instruments. Un diapason de 435 vibrations doubles (la_3 de la gamme fondamentale) est dit **normal** (**400**).

TIMBRE

Des sons de même hauteur, rendus par différents instruments, se distinguent par le *timbre*. Le timbre est dû à la superposition, au son dominant, de plusieurs de ses harmoniques.

414. Vibration par influence ou résonance. — Un corps sonore se met à vibrer s'il est en présence d'un autre corps sonore produisant un des sons qu'il peut rendre lui-même. Cette communication de vibrations par influence s'appelle *résonance*. Des ébranlements, périodiquement répétés, transmis par le milieu ambiant, accumulent leurs effets sur un corps sonore; ils augmentent l'amplitude de ses vibrations, si leur période est précisément celle d'un son que le corps sonore influencé peut émettre (1).

Nous avons vu qu'un tuyau entre en vibration par résonance.

Le son faible d'un diapason prend une ampleur considérable si on le pose sur une caisse de résonance de dimensions appropriées formant *tuyau sonore;* quand son mouvement paraît éteint, il suffit de le poser sur sa caisse pour l'entendre de nouveau.

Prenons deux diapasons *vibrant à l'unisson*, munis de leurs

---

(1) L'action mécanique de la résonance apparaît nettement, quand on exerce sur un pendule de période T, des impulsions intermittentes à des intervalles de temps égaux à T, en faisant concorder le sens de ces impulsions avec le sens de l'impulsion propre du pendule; l'amplitude du corps oscillant devient considérable alors que chacune des impulsions successives est petite. Une image de l'effet produit est fournie par une balançoire dont on renforce périodiquement le mouvement, par des impulsions de même sens, au passage par la position d'équilibre.

caisses de résonance, les ouvertures de ces caisses se faisant face à plusieurs mètres de distance. Quand on fait vibrer directement l'un des diapasons, le second se met bientôt à vibrer; si, en effet, on arrête avec la main le mouvement vibratoire du premier, *le son du second se prolonge seul* et est entendu très nettement.

Ayant ouvert la caisse d'un piano et soulevé les étouffoirs avec la pédale pour permettre aux cordes de vibrer librement, chaque son émis dans le voisinage et entretenu un temps suffisant, provoque par résonance la vibration d'une corde accordée pour le même son ou pour un de ses harmoniques (1).

La résonance est utilisée dans l'étude du timbre.

415. Son simple. Son composé. — On appelle *son simple* un son qui ne correspond qu'à un nombre déterminé et unique de vibrations. Un son est le plus souvent *composé*, de même qu'une couleur résulte habituellement de la superposition de couleurs simples.

Une corde vibrant transversalement, une colonne élastique vibrant longitudinalement peuvent rendre *successivement* un son fondamental et ses harmoniques. Mais ces harmoniques *coexistent* aussi avec le son fondamental.

Lorsque, par exemple, une corde vibre dans toute sa longueur, une oreille exercée reconnaît que le son fondamental, qui est dominant, est accompagné de sons harmoniques. *En même temps qu'elle vibre dans sa totalité, la corde s'est, en effet, subdivisée d'elle-même en 2, en 3, en 4... segments égaux, vibrant simultanément.* Le son d'une corde vibrante, est donc *composé*.

Les diapasons, les tuyaux sphériques rendent des sons simples. — Un *diapason* émet un son *simple* parce que les harmoniques qui accompagnent le son fondamental s'éteignent rapidement. Pratiquement, un *tuyau sphérique* ne renforce aussi qu'un son. Cette propriété des tuyaux sphériques les a fait utiliser pour l'analyse des sons; on les appelle alors spécialement des *résonateurs*.

D'après la **loi de similitude**, les hauteurs des sons renforcés par différents tuyaux sphériques varient en raison inverse de leurs rayons. On peut donc construire une série de tuyaux sphériques rendant des notes déterminées.

416 Analyse des sons. — Pour l'analyse des sons, on emploie des *sphères creuses* de verre ou de cuivre S, munies de deux orifices

(1) Quand un son, de longueur d'onde λ, est émis au voisinage d'une corde vibrante ou d'un tuyau ouvert, il y a résonance de la corde ou du tuyau si la longueur L de la corde ou du tuyau est un multiple exact de la demi-longueur d'onde (**431**).

opposés. Le plus grand, F, est une sorte de pavillon qui s'ouvre au dehors; l'autre, G, a la forme d'un col allongé et creux qu'on introduit dans l'oreille (fig. 428). Un tuyau sphérique vibre bruyamment par influence lorsque le son qu'il peut renforcer est produit devant lui. S'il est relié à une capsule manométrique, les oscillations de la flamme dans un miroir tournant rendent visible le renforcement.

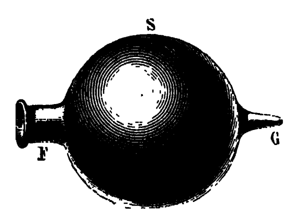


Fig. 428.

Un son simple, tel que le son d'un diapason, n'est renforcé que par un seul tuyau sphérique; les autres restent silencieux.

Quand deux instruments différents rendent *une même note,* cette note *prédomine* et le nombre de vibrations fourni par la sirène ou par la méthode graphique sera le même dans les deux cas; mais des *harmoniques s'ajoutent au son principal.* Si l'on a construit une série de tuyaux sphériques distincts, convenant respectivement à la note considérée et à ses harmoniques successifs, on reconnaît pour chacun des deux instruments les harmoniques spéciaux qui accompagnent la même note, en introduisant successivement dans l'oreille chacun des résonateurs de la série.

L'analyse des sons confirme le rôle joué en musique par les sons harmoniques. Un son paraît d'autant plus musical qu'il est plus riche en harmoniques peu élevés superposés au son principal.

Nature du timbre. — Deux sons, de même hauteur et de timbres différents, se distinguent par le *nombre,* le *rang* et l'*intensité* des harmoniques superposés au son qui prédomine; la fusion des sensations dues au son principal et aux sons accessoires produit le timbre. Deux corps sonores qui rendent un même son simple ont le même timbre. Les sons simples *ne se caractérisent donc que par l'intensité et la hauteur.*

417. Synthèse des sons. — On prend une série d'électro-diapasons, rendant respectivement un son déterminé et ses harmoniques successifs. Devant chacun d'eux, on place le résonateur sphérique qui le renforce; puis, en ouvrant plus ou moins ou en fermant certains résonateurs, on associe au son fondamental un ou plusieurs de ses harmoniques avec une intensité variable; on réalise ainsi des timbres différents pour le même son principal.

418. Distinction entre un son musical et un bruit. — Les sons composés qui ne sont pas formés par la superposition d'harmoniques n'ont pas le caractère musical : ce sont des *bruits*

(par exemple le bruit des vagues). *Les bruits résultent de la réunion de sons discordants ou dont les nombres de vibrations n'ont pas de rapports simples.* On obtient un bruit en faisant parler une sirène dont le disque mobile est percé de trous irrégulièrement distribués sur une circonférence qui a son centre sur l'axe.

419. Étude du timbre par les tracés graphiques. — La méthode graphique distingue les différents timbres. Pour des sons de même hauteur, le *nombre* des ondulations comprises entre deux mêmes génératrices du cylindre enregistreur est le même. La *forme* des ondulations varie avec le timbre.

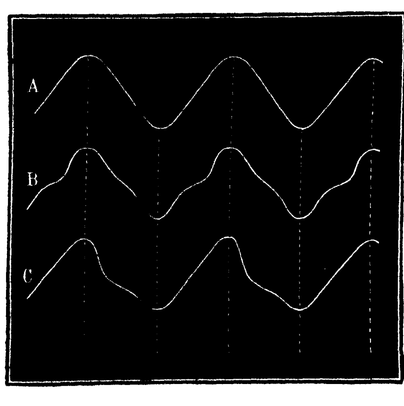


Fig. 429.

Le mouvement vibratoire d'un son simple est représenté par une courbe ondulée régulière, une *sinusoïde;* il est comparable au mouvement d'un pendule (courbe A, fig. 429).

Dans le tracé de sons composés de même hauteur, mais de timbres différents, chaque ordonnée est, en chaque point, la *somme algébrique de plusieurs ordonnées.* Des tracés où la période de l'oscillation principale est la même, mais *où les formes sont diffé-*

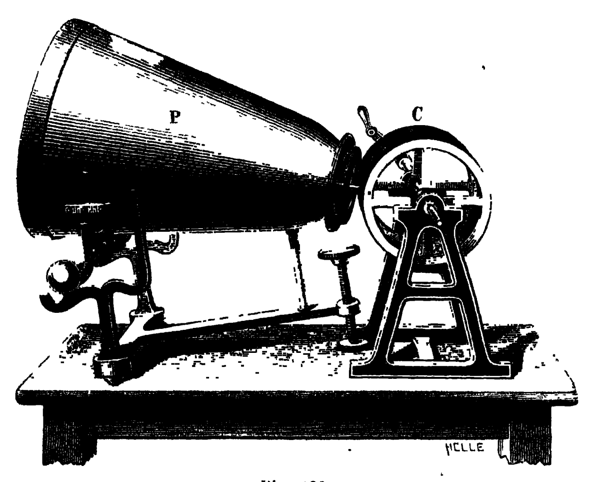


Fig. 430.

rentes, proviennent d'une association différente de sons accessoires. La période du son principal étant un multiple entier de la période de chacun des harmoniques, l'addition de ces sons ne modifie pas le nombre des ondulations principales. Les grandes ondulations correspondent au son principal, les sinuosités sont produites par les harmoniques du timbre.

420. Phonautographe (fig. 430). — Les tracés des vibrations sonores sont fournis par le corps sonore lui-même, s'il est possible d'y adapter directement un style, et par le phonautographe si la source sonore ne se prête pas à l'inscription directe. Le phonautographe est formé d'une *membrane tendue* dans le plan focal d'un paraboloïde de révolution P. Le corps sonore vibre à l'orifice du paraboloïde, qui renforce le son. La membrane entre en vibration, et un style très léger fixé perpendiculairement à sa face extérieure inscrit les vibrations sur un cylindre enregistreur.

421. Phonographe (fig. 431). — Edison a fait servir l'inscription graphique à la *reproduction des sons* qui l'ont produite (fig. 432).

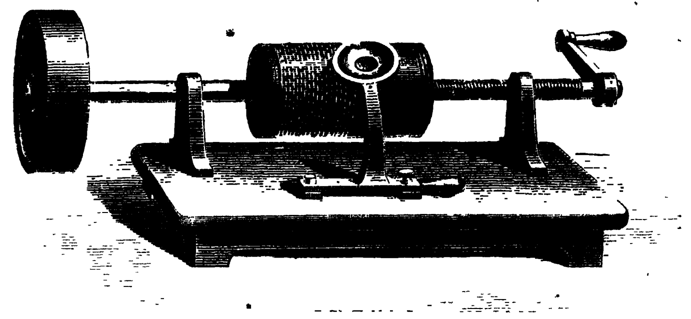


Fig. 431.

La partie essentielle d'un phonographe est une *membrane élastique*, en verre très mince, fermant un cornet évasé B devant lequel on produit les sons qu'on veut inscrire, puis reproduire. La membrane vibre à l'unisson des mouvements oscillatoires que l'air lui transmet.

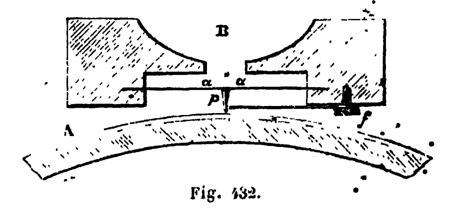


Fig. 432.

Une pointe *p*, implantée normalement à la membrane *α*, appuie par son extrémité libre sur un cylindre de cire A bien poli. Ce cylindre est emboîté dans un mandrin de métal et tourne avec lui par un mouvement d'horlogerie, en même temps qu'il se déplace

suivant son axe dans un écrou E (fig. 431). La pointe, si elle est immobile, trace dans la cire un léger sillon en hélice, de profondeur constante, dont le pas est celui de la vis V. Si la membrane vibre, la pointe inscrit dans la cire des sinuosités dont la profondeur, le nombre et la forme correspondent à l'intensité, à la hauteur et au timbre des sons émis. Le gaufrage obtenu sur le cylindre de cire est un *phonogramme* qu'on peut retirer et conserver.

Pour la *reproduction* des sons inscrits, qu'ils proviennent d'une conversation, d'un discours ou d'un air de musique, on ajuste le phonogramme sur le mandrin du même appareil ou d'un appareil identique, et on substitue au cornet inscripteur un cornet répétiteur identique, sauf que la pointe est mousse, afin de ne pas altérer le sillon. Si le cylindre *est mis en mouvement dans le même sens que primitivement,* la pointe suit le fond du sillon tracé. en partant de l'origine du gaufrage; le sillon réagit sur la pointe et l'oblige à exécuter, avec toutes leurs particularités, les mouvements de l'inscription. Ces mouvements se communiquent à la membrane, lui font répéter les vibrations du tracé et reproduisent les sons primitifs avec leur timbre. Renforcés par un pavillon, les sons peuvent être entendus d'un auditoire. Le même phonogramme est utilisé pour de nouvelles reproductions.

HISTORIQUE

Les connaissances des anciens en Acoustique tiraient leur origine de la Musique. *Pythagore,* au VIe siècle avant l'ère chrétienne, s'est occupé de la gamme et de ses divisions. *Aristote* savait que le son est le résultat d'un mouvement excité dans le corps sonore et transmis à l'oreille par un milieu; il attribuait l'écho à la réflexion du son; il savait aussi que les impulsions imprimées à l'air pour un son aigu sont en plus grand nombre, dans un même temps, que pour un son grave.

Le P. *Mersenne,* contemporain de Pascal et de Descartes, fut le premier à compter les nombres de vibrations qui correspondent aux différents sons. Vers 1630, il établit expérimentalement les lois des vibrations des cordes sur des cordes très longues, ne faisant qu'un petit nombre de vibrations par seconde et ne rendant pas de son. Admettant ces lois pour des cordes courtes, vibrant rapidement et rendant un son, on cherche quelle longueur et quelle section il faut donner à une corde pour la mettre à l'unisson du son étudié.

La sirène de *Cagniard-Latour* date de 1818. L'idée de la méthode graphique est due au physicien anglais *Thomas Young;* elle a été appliquée pour la première fois par *W. Weber* (1830). Le phonographe a été inventé en 1877 par l'Américain *Edison.*

Chez les Grecs et les Romains, les notes de la gamme étaient désignées par des lettres, comme elles le sont encore en Allemagne et en Angleterre. Au XIe siècle, *Gui d'Arezzo,* l'inventeur de l'écriture musicale, les représenta par les premières syllabes des premiers vers de l'hymne de la fête de saint Jean-Baptiste.

Les premières expériences méthodiques sur la vitesse du son dans l'air ont été effectuées en 1738 par des membres de l'Académie des Sciences; les expériences de *Regnault* ont été faites en 1866. *Otto de Guéricke* avait démontré que le son ne se propage pas dans le vide. *Colladon,* en 1827, mesura, sur le lac de Genève, la vitesse de propagation du son dans l'eau.

Les lois des harmoniques des tuyaux ont été formulées par *Daniel Bernouilli*, en 1762; le P. *Mersenne* avait fait connaître antérieurement la loi de la similitude.

L'origine du timbre, entrevue par *Monge*, a été établie expérimentalement par les recherches d'*Helmholtz*, en 1863.

MOUVEMENTS VIBRATOIRES

422. Mouvement vibratoire. — Un mouvement vibratoire est un mouvement périodique déterminé dans un **corps élastique**. Des molécules d'un corps élastique, écartées de leur position de repos, y reviennent, par l'effet de liaisons avec les molécules non déplacées, quand cesse la cause du déplacement. La vitesse qu'elles prennent dans le retour, leur fait dépasser leur position primitive et chacune des molécules *oscille entre deux positions extrêmes*, situées de part et d'autre de sa position d'équilibre. Telles sont les vibrations qu'on obtient en déplaçant l'extrémité supérieure d'une lame d'acier fixée dans un étau (fig. 387).

Une ***vibration complète*** est le mouvement d'aller et de retour, de D′ en D″ et de D″ en D′. Une *vibration simple* ne comprend que l'aller ou le retour. La vitesse d'une molécule est nulle à l'écart maximum D′ et D″; la vitesse est maximum au point D d'écart nul.

L'***amplitude*** d'excursion d'une molécule vibrante est la distance d'une de ses positions extrêmes à sa position de repos.

Tant que les excursions des molécules *restent très petites,* elles sont **isochrones** ou d'égale durée, comme les oscillations d'un pendule, *indépendamment de l'amplitude* de l'excursion.

La **période** T est la *durée d'une vibration complète;* c'est le temps qui sépare deux passages consécutifs d'une molécule par sa position de repos, dans le même sens. La durée d'une *vibration simple* est une demi-période. Le nombre n de vibrations par seconde, ou la ***fréquence,*** est l'inverse de la période, puisque $n\mathrm{T} = 1$.

Pour l'étude d'un mouvement vibratoire, il est avantageux de représenter les écarts successifs d'une molécule vibrante. A cet effet,

on compte les temps sur une ligne horizontale, l'origine du temps correspondant à la position de repos; à un temps t, égal à Am, on figure le déplacement par une ordonnée Mm menée au point m.

La courbe représentative (fig. 433) est formée de deux parties : l'une, *au-dessus de l'horizontale,* pour les déplacements qui ont lieu d'un côté de la position de repos; l'autre, *au-dessous de l'horizontale,* pour les déplacements qui ont lieu de l'autre côté. Les passages par le repos correspondent aux intersections de la courbe avec l'horizontale.

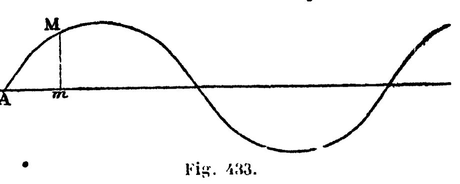


Fig. 433.

Deux ordonnées quelconques, distantes d'une ou plusieurs périodes se rapportent à des écarts pour lesquels le corps vibrant est *dans une même phase* de vibration. On appelle phase de la vibra-

Fig. 434.

tion, à un temps t, le rapport, à la période T, du temps t écoulé depuis le passage du corps vibrant par sa position de repos.

La courbe représentative d'un mouvement vibratoire a des formes variées. La courbe d'un mouvement oscillatoire pendulaire est une sinusoïde. Pour cette forme, deux ordonnées, distantes d'une demi-période sont égales et contraires, elles se rapportent à *des phases opposées*.

Un mouvement vibratoire quelconque, peut être décomposé en un mouvement sinusoïdal et ses harmoniques. Le tracé 1 de la figure 434 est une sinusoïde de période T: le tracé 2 est une sinusoïde de période $\frac{T}{2}$; le tracé 3 est la superposition des vibrations 1 et 2, de même phase au départ; le tracé 4 est la superposition des vibrations 1 et 2, offrant au départ des phases opposées; le tracé 5 est la superposition de 1 et 2, ayant au départ une différence de phase d'un quart de période.

ONDES LIQUIDES

Un mouvement vibratoire se propageant dans un milieu élastique suivant un mode uniforme, nous prendrons l'exemple du mouvement vibratoire dû à la chute d'une pierre dans l'eau.

423. Propagation d'une onde liquide. — Quand on laisse tomber une pierre en un point d'un liquide immobile, le liquide s'enfonce brusquement, déprimé par le choc. Après avoir atteint un niveau minimum, il est ramené vers sa position initiale par ses liaisons latérales. Sa vitesse acquise lui fait dépasser, au retour, la surface libre, et un soulèvement succède à la dépression; le liquide exécute ainsi quelques *oscillations verticales*.

Chacun des mouvements verticaux de va-et-vient se communique au liquide environnant autour du point choqué. Comme la propagation a lieu de la même façon dans toutes les directions, une dépression circulaire s'étend au large en s'agrandissant, suivie d'un soulèvement qui s'étend à son tour. Des rides circulaires, en forme de *sillons* et de *crêtes* concentriques, se suivent en reproduisant les dépressions et les soulèvements du centre choqué. Ces rides se propagent encore, alors que le mouvement du centre a cessé.

Il n'y a pas *entraînement du liquide suivant la propagation;* on peut s'en convaincre en projetant de la poussière de liège à la surface. Le seul mouvement de la poussière, au passage des rides, est un

mouvement de descente et d'élévation, *sans qu'il y ait translation.* Les rides s'effacent peu à peu en s'éloignant du centre, car la force vive des molécules centrales se dissémine sur des circonférences de plus en plus grandes. Si le point choqué est entretenu dans un état oscillatoire persistant, par des chocs répétés, à intervalles égaux et très rapprochés (par exemple, en y plongeant une pointe fixée à l'une des branches d'un diapason en vibration), le liquide apparaît sillonné sur toute sa surface de rides circulaires équidistantes.

En un point *d'une même circonférence* ayant pour centre le point choqué, il faut une demi-période pour qu'une molécule liquide passe du fond d'un sillon au sommet d'une crête. Partie du fond d'un sillon, elle est revenue au fond après une période.

Longueur d'onde. — *Au même instant,* deux sillons consécutifs comprennent entre eux une crête ; l'ensemble d'un sillon et de la crête qui le suit forme une **onde**. Sur un rayon issu du centre, la distance des points les plus bas de deux sillons consécutifs ou des points culminants de deux crêtes consécutives. est l'espace parcouru par le mouvement vibratoire pendant une période. Cet espace, dit **longueur d'onde**, est désigné par la lettre λ.

L'espace λ, parcouru pendant la durée d'une vibration, est égal au produit VT de la vitesse V de propagation par la période T.

S'il y a au centre n vibrations par seconde, les vibrations ont parcouru, après n périodes, une longueur $n\lambda$, égale à la vitesse V. L'équation $V = n\lambda$ équivaut à $\lambda = VT$, puisque $nT = 1$.

Les vibrations liquides précédentes sont des vibrations **transversales,** c'est-à-dire perpendiculaires à la direction de propagation. Un autre exemple de vibrations transversales est fourni par un *tube de caoutchouc,* peu tendu et fixé à ses deux bouts. Par un choc perpendiculaire à sa direction, il se déforme et présente des sinuosités ondulatoires d'une extrémité à l'autre. Les vibrations lumineuses, calorifiques, électriques sont également transversales.

INTERFÉRENCES

424. On laisse tomber verticalement d'une même hauteur et en même temps, deux pierres égales en deux points voisins, O et O′, d'une eau tranquille. Les oscillations verticales, provoquées aux deux points choqués, donnent naissance à *deux systèmes d'ondes circulaires* ayant leurs centres respectivement en O et en O′. Ces deux systèmes s'entrecroisent, mais chacun se propage d'une fa-

çon indépendante. En chaque point de la surface, le déplacement vertical des molécules est la somme des déplacements que chacun des systèmes produirait séparément. En des points tels que L (fig. 435), où une crête du premier système (issu de O) coïncide

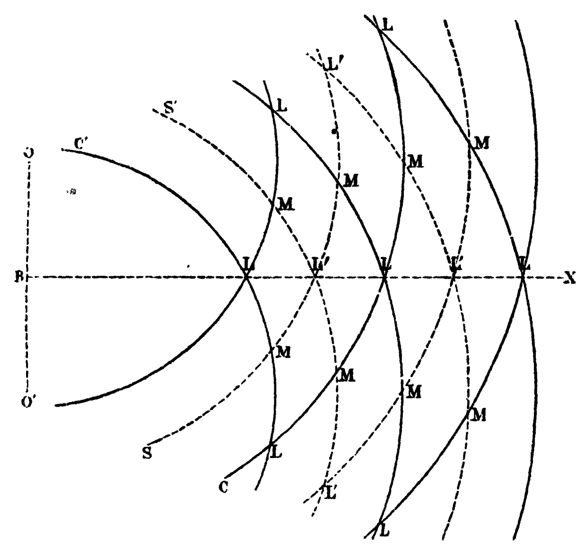


Fig. 435.

avec une crête du deuxième système (issu de O'), l'eau s'élève à une hauteur double au-dessus du niveau primitif. Aux points L', où des sillons des deux systèmes coïncident, la dépression est double. En des points M, où un sillon du premier système se superpose à une crête du deuxième système, les mouvements se détruisent et le niveau reste le niveau moyen.

En enfonçant périodiquement deux pointes en O et en O', en même temps et également, deux systèmes d'ondes de centres O et O', de même longueur d'onde, couvrent toute la surface. L'effet est très apparent si l'on remplace l'eau par du mercure.

Les intersections L ou L' de *deux crêtes* ou de *deux sillons*, où le mouvement est maximum, sont *fixes*. En ces intersections, la différence des distances aux deux sources d'ébranlement vaut *un nombre pair de demi-longueurs d'onde*. Les points de rencontre M *d'une crête et d'un sillon*, où le mouvement est minimum, sont également fixes; la différence de leurs distances aux deux sources vaut *un nombre impair de demi-longueurs d'onde*. C'est à la destruction du mouvement par superposition de deux mouvements contraires que s'applique spécialement l'expression d'**interférences**.

INTERFÉRENCES PAR RÉFLEXION

425. En rencontrant un plan rigide (fig. 436), une onde liquide émanant d'un centre O, revient vers le centre. L'onde réfléchie semble partir de O′, *symétrique* de O par rapport au plan AB. L'onde directe issue de O et l'onde réfléchie venant de O′ se propagent en sens contraires et s'entre-croisent en avant du plan.

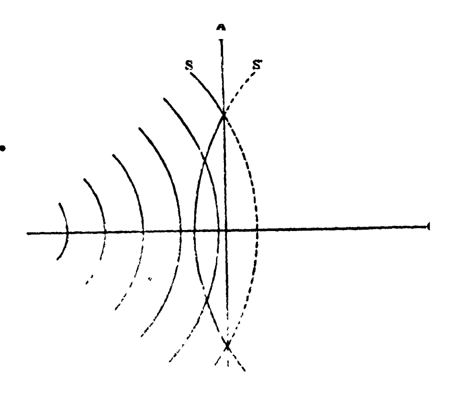


Fig. 436.

Lorsqu'un mouvement vibratoire périodique est entretenu en O, le mouvement vibratoire issu de O′ persiste également. Les deux sources O et O′ donnent alors naissance à deux systèmes d'ondes circulaires qui coexistent. L'entre-croisement de ces deux systèmes donne lieu à la superposition de deux mouvements. Ici, le déplacement résultant des molécules liquides n'est plus minimum, aux points où la différence des distances à O et O′ vaut un nombre impair de demi-longueurs d'onde; dans le cas actuel, le déplacement résultant est nul contre la paroi en N, à égale distance de O et O′. La règle est *renversée*, il y a des *nœuds fixes*, là où la différence des distances aux deux points O et O′ vaut un nombre *pair* de demi-longueurs d'onde.

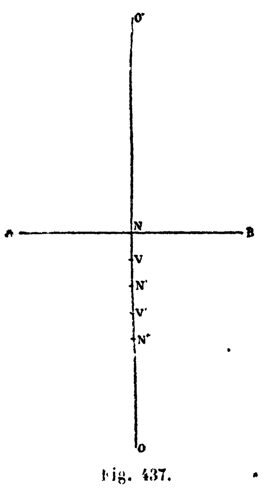


Fig. 437.

Sur la normale à la surface réfléchissante (fig. 437), un point N′, distant de N de $\frac{\lambda}{2}$ est un nœud; car, d'après $N'O' = NO' + \frac{\lambda}{2}$ et $N'O = NO - \frac{\lambda}{2}$, $O'N' - ON'$ vaut λ. Le point N″, distant de $\frac{\lambda}{2}$ de N′, est encore un nœud.

Sur la normale OO′ il y a, d'autre part, des **ventres fixes**, où le déplacement est maximum. En ces points, la différence des distances

aux centres O et O′ vaut un nombre impair de demi-longueurs d'onde. V distant de N de $\frac{\lambda}{4}$ et V′ distant de V de $\frac{\lambda}{2}$ sont des ventres, car $O'V - OV = \frac{\lambda}{2}$, et $O'V' - OV' = 3\frac{\lambda}{2}$...

ONDES SONORES

426. L'une des branches d'un diapason vibrant est munie d'un style; la pointe appuie légèrement sur la surface d'un cylindre tournant et oscille parallèlement aux génératrices du cylindre, en traçant une courbe sinueuse (fig. 438).

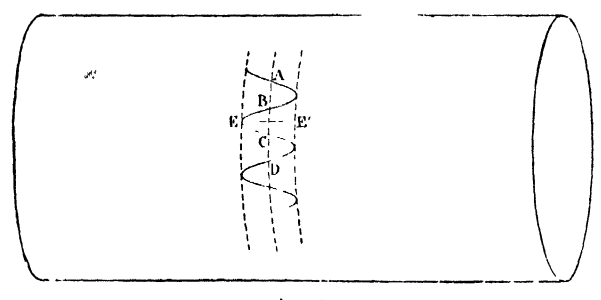


Fig. 438.

Pour une oscillation complète du diapason, le tracé se compose de deux moitiés symétriques d'une sinusoïde. Sur une circonférence perpendiculaire à l'axe du cylindre, la distance AC de deux points de la courbe semblablement placés, est constante quand la rotation du cylindre est uniforme. Le temps employé par le cylindre pour tourner de l'arc AC est la *période*. La distance EE′ des écarts extrêmes est le double de l'*amplitude*. Le nombre de sinuosités tracées en une seconde est la fréquence ou la *hauteur*. L'espacement AC, étant indépendant de l'étendue de l'excursion EE′, les oscillations sont *isochrones*.

Avec un corps vibrant autre qu'un diapason, la courbe tracée est rarement sinusoïdale ou pendulaire; sa forme varie avec l'instrument sonore, elle correspond au timbre (**419**).

427. Propagation du son dans un tuyau cylindrique. — Si l'on fait vibrer une lame élastique à l'origine d'un tuyau cylindrique rempli de gaz, chacun des mouvements de va-et-vient de la

lame est reproduit de proche en proche par les couches gazeuses successives du tuyau. Une membrane tendue, perpendiculaire à l'axe du tuyau, reproduit en un point quelconque du trajet, les oscillations de la lame vibrante et, en même nombre par seconde. Toutefois. elle les répète avec un retard $\frac{x}{V}$, x étant sa distance à l'origine du tuyau et V la vitesse de propagation du mouvement.

Une oscillation complète de la lame élastique comprend une excursion en avant de a en a' (fig. 439), d'une durée d'une demi-période, et une excursion égale en arrière, de a' en a, dont la durée est encore une demi-période. Comme pour un pendule, les vitesses de la lame sont nulles en a et a', où le déplacement est maximum; la vitesse est maximum au passage par la position d'équilibre, en A, où l'écart est nul.

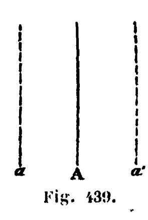


Fig. 439.

Si la source sonore donne un son simple, les écarts successifs de A suivent une loi sinusoïdale et sont représentés, à chaque instant t, par

$$y = a \sin 2\pi \frac{t}{T}$$

a étant l'écart maximum et T la période (fig. 440).

Les écarts se communiquent aux diverses tranches perpendiculaires à l'axe AC du tuyau. Un point M, tel que AM $= x$, reproduit les écarts de la source avec un retard $\frac{AM}{V} = \frac{x}{V}$.

Comparés aux écarts de A, les écarts de M sont, à un même instant t,

$$a \sin 2\pi \frac{t - \frac{x}{V}}{T} = a \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right), \text{ en posant } \lambda = VT.$$

$\frac{x}{\lambda}$ ou, le plus souvent $\frac{2\pi x}{\lambda}$, s'appelle la phase de la vibration en M. Si l'on fait croître x de λ, 2λ, 3λ..., la phase augmente de 2π, 4π,... et le sinus a la même valeur. A tout moment, *deux points distants de* λ, 2λ, 3λ... *sont dans le même état vibratoire* ou dans la même phase de vibration.

Lorsque x croît de $\frac{\lambda}{2}$, $\frac{3\lambda}{2}$... la phase augmente de π, 3π,... et le sinus

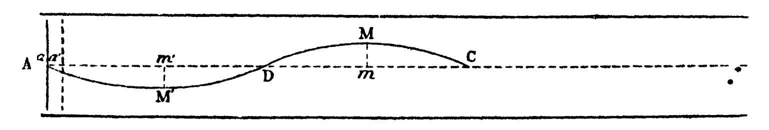


Fig. 440.

change de signe en ayant la même valeur absolue qu'aux distances λ, 2λ...

Donc, *deux points distants de* $\frac{\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, \frac{5\lambda}{2}, \ldots$ *sont dans des états vibratoires contraires* ou dans des phases opposées.

Représentons la courbe figurative des écarts, sur le trajet du tuyau, à l'instant où le corps vibrant est dans sa position d'équilibre A, avant d'aller vers a' (fig. 440).

A la position d'équilibre, en A, $t = 0$, $y = 0$. En un point M′ situé à une distance $x = \frac{\lambda}{4}$, $\frac{x}{V} = \frac{T}{4}$, $y = a \sin 2\pi \left(0 - \frac{1}{4}\right) = - a \sin \frac{\pi}{2} = - a$. En D, à une distance $\frac{\lambda}{2}$, $\frac{x}{V} = \frac{T}{2}$ et $y = 0$. Le point M a l'écart maximum a. La courbe figurative des écarts pour une période entière est formée de deux parties symétriques. Enfin, $AC = \lambda$.

La représentation des écarts, à un instant donné, sur tout le tuyau, est une succession de courbes identiques à la courbe ADC.

Dans l'excursion en avant, de a en a', la lame déplace, en la comprimant, la tranche d'air contiguë ; celle-ci déplace et comprime à son tour la tranche suivante et, en une demi-période, la compression s'étend sur une demi-longueur d'onde. Dans l'excursion en arrière, de a' en a, la lame élastique entraîne avec elle la tranche d'air contiguë ; celle-ci entraîne la suivante, ce qui détermine, en arrière de la lame, un vide partiel ou une dilatation. La dilatation, comme la compression, couvre une demi-longueur d'onde, en une demi-période.

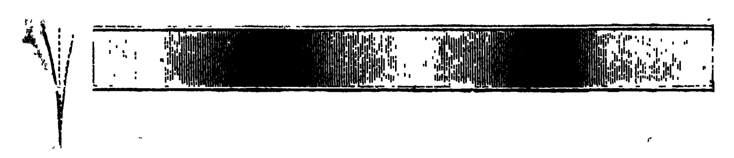


Fig. 442.

Une compression C et une dilatation D constituent une onde sonore complète, de longueur λ (fig. 442).

Après une demi-période, une compression est remplacée par une dilatation et vice versa. Une demi-onde comprimée est comparable à une crête d'une onde liquide, une demi-onde dilatée est comparable à un sillon. Mais dans la propagation d'une onde sonore, les *petits* déplacements des molécules d'air, dans les tranches successives, ont lieu *dans le sens même de la propagation,* au lieu de lui être perpendiculaires. Pour cette raison, les ondes sonores sont dites longitudinales.

Les tranches d'air n'éprouvent d'ailleurs que des déplacements très limités ; la propagation se fait sans transport de matière et elle

est rapide, puisqu'elle a lieu, à 0°, avec une vitesse de 331 mètres.

428. Propagation du son dans un milieu indéfini. — Dans un milieu indéfini, la propagation des ondes sonores a lieu, de proche en proche, comme dans un tuyau. Si le milieu présente les mêmes propriétés dans toutes les directions, les points qui sont

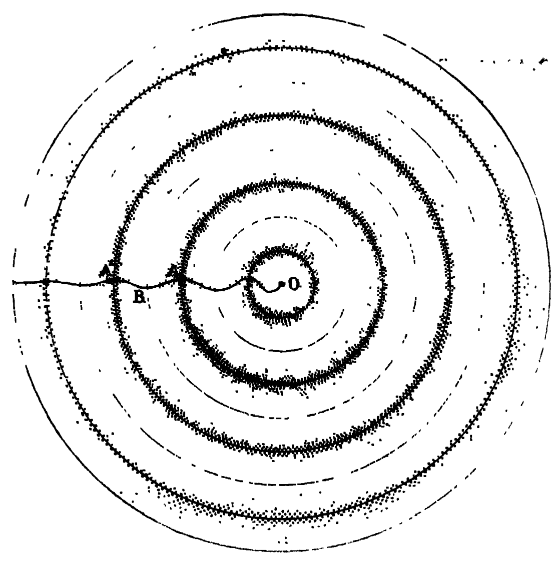


Fig. 443.

animés d'un même mouvement occupent des surfaces d'onde sphériques. Une onde sonore ne forme plus, comme dans un tuyau, une couche cylindrique d'épaisseur λ, mais une couche sphérique d'épaisseur λ, qui a pour centre le centre O de vibration.

Deux points A et A′ (fig. 443) appartenant à deux sphères distantes d'un nombre pair de demi-longueurs d'onde sont, au même instant, dans le même état vibratoire; deux points A et B appartenant à deux sphères distantes d'un nombre impair de demi-longueurs d'onde ont, au même instant, des déplacements égaux et contraires, ou sont dans des phases de vibrations opposées.

INTERFÉRENCES SONORES

429. Plusieurs mouvements vibratoires, émanant de sources sonores différentes, se propagent sans se gêner, comme si chacun

d'eux existait seul. Aux points d'entrecroisement, ils s'ajoutent ou se retranchent suivant leur sens.

Considérons deux sources sonores S et S', *de même période* et de même amplitude, vibrant toutes deux à l'entrée d'un tuyau qui contient de l'air, les particules d'air se déplacent suivant l'axe. Sur une tranche M perpendiculaire à l'axe du tuyau, le déplacement des particules d'air est, à chaque instant, *double* de ce qu'il serait avec une seule source, si la différence SS' = SM — S'M, *vaut un nombre pair de demi-longueurs d'onde.* Le déplacement est nul, il y a **interférence** et silence *continu*, si la différence SS' = SM — S'M, *vaut un nombre impair de demi-longueurs d'onde.*

L'interférence de deux sons, de même période et de même amplitude, se réalise avec une source unique, placée en face de l'ouverture A

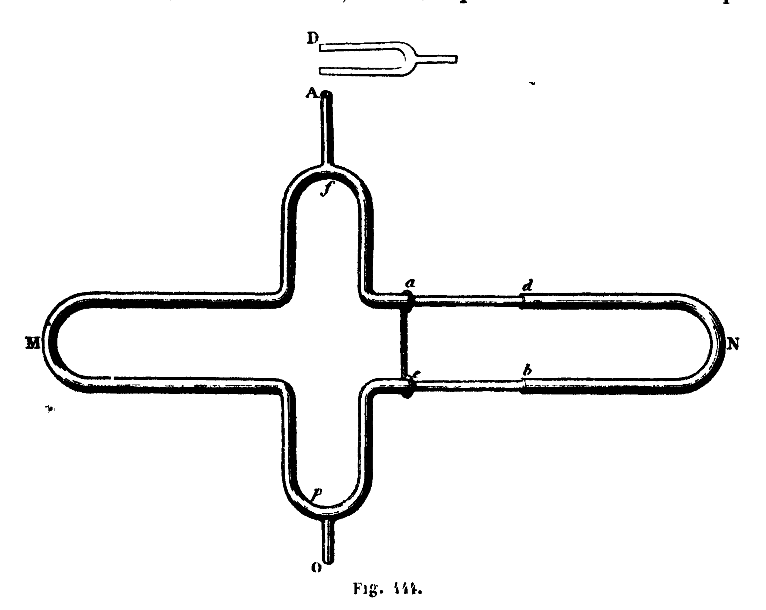


Fig. 444.

d'un tuyau A*f* qui se bifurque en deux branches. L'une des branches, M, a une longueur constante (fig. 444); l'autre N, formée de tubes emboîtés, peut coulisser à volonté. Les deux branches M et N se réunissent en un tube commun *p*O.

Devant l'ouverture A on fait vibrer un diapason D; le son se bifurque et les deux sons, après avoir parcouru séparément M et N, se réunissent en O pour parvenir ensemble à l'oreille. Les deux sons ont la même période que le diapason.

1° Pour une même longueur des deux branches M et N, les

deux mouvements vibratoires, parvenus en O, sont à tout instant concordants, c'est-à-dire égaux et de même sens; ils s'ajoutent et le son est renforcé. En allongeant la partie mobile N, on peut rendre la différence des chemins parcourus, de A en O, égale à λ $\left(ad = eb = \frac{\lambda}{2}\right)$, 2λ, 3λ..., suivant qu'on suit M ou N; les excursions des deux mouvements s'ajoutent en O, le son continue à être renforcé.

Le très faible affaiblissement du son dans un tuyau fait que, en O, les deux mouvements impriment séparément à une même tranche d'air, des excursions de même amplitude.

2° Si la longueur de droite a été accrue de telle façon que la différence des distances du point O à la source, par M ou par N, devienne $\frac{\lambda}{2}$ $\left(ad = eb = \frac{\lambda}{4}\right)$, $3\,\frac{\lambda}{2}$, $5\,\frac{\lambda}{2}$, les deux excursions en O sont égales et de signes contraires, l'amplitude résultante est nulle et, *à tout instant*, il y a *silence*. Une flamme manométrique, disposée en O, fait voir, au miroir tournant, une bande lumineuse uniforme.

On peut *mesurer la longueur d'onde* du son du diapason D. En effet, la demi-longueur d'onde est la longueur $2ad$, dont on a allongé le parcours N de droite, pour passer du renforcement primitif (des branches égales) au premier silence.

Si, d'autre part, on a déterminé la fréquence n du diapason, la relation $V = n\lambda$ donne la vitesse V du son dans le gaz qui remplit le tuyau.

INTERFÉRENCES PAR RÉFLEXION

430. Une source sonore placée en O, devant un mur vertical AB. (fig. 437), produit des interférences par la superposition des deux systèmes d'ondes, l'un direct, l'autre réfléchi, qui émanent du point O et de son symétrique O′ par rapport au mur. La position des nœuds et des ventres se détermine à l'oreille ou en déplaçant, le long d'une normale OO′ au mur, une membrane élastique, parallèle au mur et munie d'un pendule léger. *Aux nœuds,* la membrane reste au repos ainsi que le pendule; *aux ventres,* la vibration de la membrane est maximum ainsi que le tremblement du pendule. La position des nœuds et des ventres s'observe encore avec la flamme d'une capsule manométrique.

Le plan du mur est un nœud. L'extinction du mouvement se retrouve aux points dont *la distance au mur vaut un nombre entier de demi-longueurs d'onde.*

431. INTERFÉRENCES DANS LES TUYAUX SONORES. — La propriété que présente un tuyau sonore de renforcer certains des sons émis à son embouchure s'explique par des interférences entre une onde **directe**, émanant du corps vibrant à l'orifice, et une onde **réfléchie** sur le fond du tuyau.

Conditions de renforcement. — Un son particulier est renforcé par un tuyau si, à son retour à l'orifice, le mouvement réfléchi imprime aux molécules un écart *en concordance* avec celui du mouvement direct.

TUYAU FERMÉ. — Dans un **tuyau fermé** de longueur L, une 1[re] onde directe qui, après réflexion sur le fond, est revenue se réfléchir à l'orifice, a parcouru 2L. Elle retourne alors vers le fond, en concordance avec une 2[e] onde directe et la renforce, si 2L vaut $\frac{\lambda}{2}$ ou $\frac{3\lambda}{2}$ ou $(2K+1)\frac{\lambda}{2}$. En effet, deux ondes qui ont toujours voyagé dans le même sens sont en accord si la différence de leurs trajets est $2K\frac{\lambda}{2}$, mais une réflexion de la 1[re] onde sur le *fond résistant* du tuyau renverse la règle (**425**).

Loi des harmoniques. — Un son, d'une longueur d'onde λ_1, telle que $2L = \frac{\lambda_1}{2}$ ou $L = \frac{\lambda_1}{4}$ est donc renforcé. D'autre part, d'après $V = n_1\lambda_1$, où l'on remplace λ_1 par $4L$, la fréquence n_1 du son renforcé est $n_1 = \frac{V}{4L}$.

Un son d'une longueur d'onde λ_3, telle que $2L = \frac{3\lambda_3}{2}$ ou $L = \frac{3\lambda_3}{4}$, est encore renforcé. Sa fréquence, d'après $V = n_3\lambda_3$, où l'on remplace λ_3 par $\frac{4L}{3}$, est $n_3 = \frac{3V}{4L}$.

Il y a aussi renforcement pour les fréquences $n_5 = \frac{5V}{4L}$, $n_7 = \frac{7V}{4L}$, etc.

Les fréquences des sons renforcés se suivent comme les nombres 1, 3, 5, 7....., c'est la loi expérimentale **des harmoniques**. La loi est ici complétée, car n_1, n_3, n_5... sont exprimés en fonction de la longueur L du tuyau et de la vitesse V du son dans le gaz vibrant.

Nœuds et ventres. — Les écarts de l'onde directe et de l'onde réfléchie, concordants à l'orifice, y produisent un ventre.

Pour un son rendu de longueur d'onde λ, les distances au fond des nœuds sont $0, 2\frac{\lambda}{4}, 4\frac{\lambda}{4}, 6\frac{\lambda}{4}\cdots$; les distances des ventres au fond sont $\frac{\lambda}{4}, 3\frac{\lambda}{4}, 5\frac{\lambda}{4}\cdots$

Subdivisions du tuyau. — Dans le tuyau, il y a un nombre impair de segments, égaux chacun à $\frac{\lambda}{4}$, formés par les intervalles d'un nœud à un ventre; la longueur L du tuyau vaut un nombre impair de fois $\frac{\lambda}{4}$.

Soit, par exemple, un son de fréquence $n_5 = \frac{5V}{4L}$, avec $L = \frac{5\lambda_5}{4}$ Partageons le tuyau en 5 parties égales de longueur $\frac{L}{5}$ (fig. 445). Le fond N est

un nœud ; il y a un ventre en V, à une distance du fond $\frac{L}{5} = \frac{\lambda_5}{4}$; un nœud en N′, un ventre en V′ ; un nœud en N″ ; un ventre en V″ à l'orifice, à la distance $\frac{5L}{5} = 5\frac{\lambda_5}{4}$.

TUYAU OUVERT. — Dans le cas d'un tuyau ouvert de longueur L, deux ondes, l'une directe, l'autre réfléchie sur le fond, considérées à l'orifice du tuyau, sont concordantes et se renforcent si la différence 2L de leurs parcours vaut un nombre pair de demi-longueurs d'onde (1).

Loi des harmoniques. — Les sons dont la longueur d'onde est donnée par $2L = 2K\frac{\lambda}{2}$ seront renforcés, K étant entier.

La longueur d'onde du son fondamental est donnée par $2L = \frac{2\lambda_2}{2}$. D'après la relation $V = n_2\lambda_2$ où l'on remplace λ_2 par $\frac{4L}{2}$, le nombre de vibrations est $n_2 = \frac{2V}{4L}$. Vient ensuite un son renforcé de longueur d'onde λ_4, tel que $2L = \frac{4\lambda_4}{2}$; d'après $V = n_4\lambda_4$, on a $n_4 = \frac{4V}{4L}$.

Il y a renforcement pour les fréquences $n_6 = \frac{6V}{4L}$, $n_8 = \frac{8V}{4L}$, etc...

Les fréquences des sons d'un tuyau ouvert sont donc entre elles comme les nombres 2, 4, 6, 8... (ou 1, 2, 3, 4) ce qui est la loi expérimentale.

N
V
N′
V′
N″
V″

Fig. 485.

Nœuds et ventres. — Lorsque le son rendu par le tuyau a une longueur d'onde λ, les distances des nœuds au fond du tuyau sont $\frac{\lambda}{4}$, $3\frac{\lambda}{4}$, $5\frac{\lambda}{4}$.....

La distance de deux nœuds consécutifs est $\frac{\lambda}{2}$.

L'embouchure et l'extrémité opposée du tuyau sont des ventres. Les distances des ventres au fond du tuyau sont alors $2\frac{\lambda}{4}$, $4\frac{\lambda}{4}$, $6\frac{\lambda}{4}$.....

Subdivisions du tuyau. Le nombre des segments est pair et comme la longueur de chaque segment est $\frac{\lambda}{4}$, la longueur L du tuyau vaut $2K\frac{\lambda}{4}$.

Représentation graphique de la production des nœuds et des ventres. — Supposons deux ondes de même période, pendulaires, c'est-à-dire sinusoïdales ou à écarts symétriques dans deux demi-périodes con-

---

(1) La réflexion se produit, aussi bien à l'extrémité *ouverte* d'un tuyau que contre un fond résistant, mais on constate expérimentalement que le plan de l'extrémité ouverte est toujours un *ventre*; il y a un nœud à une distance $\frac{\lambda}{4}$. Par suite, la tranche terminale offre une concordance complète dans l'onde directe et dans l'onde réfléchie, et il n'y a *pas de retard* introduit dans la *réflexion contre un milieu sans résistance.*

sécutives. L'une D, est directe, se propageant de l'orifice au fond du tuyau; l'autre R, est inverse; elle va, après réflexion, du fond à l'orifice. Les deux mouvements vibratoires sont figurés en prenant pour axe des abscisses la ligne de propagation ou l'axe du tuyau (fig. 446).

L'*onde directe* est représentée par la courbe pointillée 1, *l'onde réfléchie* par la courbe pointillée 2. L'écart résultant est, à chaque instant et en chaque point la courbe pleine 3, ou la somme algébrique des ordonnées des deux courbes.

Aux points V où les phases des mouvements 1 et 2 sont les mêmes, les ordonnées sont égales et de même signe, l'ordonnée résultante est leur

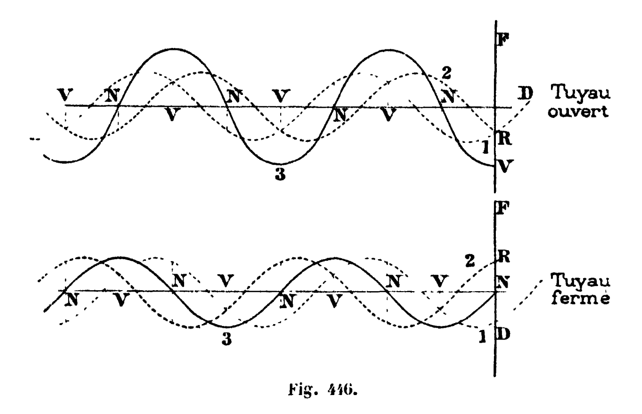


Fig. 446.

somme arithmétique, elle est double. Ces points sont les *ventres;* deux ventres consécutifs sont *distants d'une demi-longueur d'onde*, et leurs écarts ont au même instant des signes contraires.

En des points N, distants des ventres d'un quart de longueur d'onde, les ordonnées composantes sont égales et de signes contraires; les phases des deux mouvements, direct et réfléchi, sont opposées. L'ordonnée résultante est nulle. Ces points sont les *nœuds*. Deux nœuds consécutifs sont *distants d'une demi-longueur d'onde*.

Le mouvement résultant a la même période que les deux mouvements composants; ses écarts sont également symétriques dans deux demi-périodes consécutives. Sur les mouvements composants, les *points d'intersection* avec l'axe de propagation varient; sur le mouvement résultant ils *sont invariables;* le mouvement résultant est, pour cette raison, appelé une **onde stationnaire**.

Les fig. 446 donnent les représentations du mouvement résultant, dans le cas d'un tuyau sonore fermé et dans le cas d'un tuyau sonore ouvert.

Calcul algébrique de la position des nœuds et des ventres. — Soit L la longueur du tuyau, c'est-à-dire la distance de l'embouchure ou de la source sonore au fond du tuyau; appelons x la distance au fond d'un point M de la colonne d'air. Le point M est animé de deux mouvements simultanés, issus tous les deux de l'embouchure : l'un est un mouvement *direct*, l'autre a été *réfléchi* sur le fond et revient en M. L'écart résultant

d'une molécule qui vibre en M est la somme algébrique des écarts sinusoïdaux dus aux deux mouvements.

Tuyau ouvert. L — x étant la distance du point M à l'embouchure, l'écart direct est $y = a \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{L - x}{\lambda}\right)$(**427**).

L'écart réfléchi est $y' = a \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{L + x}{\lambda}\right)$: L + x est le parcours du mouvement issu de l'embouchure, réfléchi sur le fond et venu en M.

L'écart résultant est la somme $y + y' = 2\,a \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{L}{\lambda}\right)\cos 2\pi\frac{x}{\lambda}$.

Il est *nul* si $\cos 2\pi\frac{x}{\lambda} = 0$, d'où $2\pi\frac{x}{\lambda} = (2K + 1)\frac{\pi}{2}$, ou $x = (2K + 1)\frac{\lambda}{4}$.

Les points d'écart nul sont les *nœuds*, distants du fond de $\frac{\lambda}{4}$, $\frac{3\lambda}{4}$, etc.

L'écart est *maximum* si $\cos 2\pi\frac{x}{\lambda} = \pm 1$, d'où $2\pi\frac{x}{\lambda} = 2K\frac{\pi}{2}$, ou $x = 2K\frac{\lambda}{4}$.

Ces points sont les *ventres*, distants du fond de 0, $\frac{2\lambda}{4}$ etc.

Tuyau fermé. — L'écart direct est $y = a \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{L - x}{\lambda}\right)$; l'écart réfléchi est $y' = a \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{L - \frac{\lambda}{2} + x}{\lambda}\right)$; à l'espace L + x parcouru par le second mouvement, il faut ici retrancher $\frac{\lambda}{2}$, en raison de la réflexion contre le fond solide du tuyau. La somme $y + y'$ est égale à :

$$2a \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{L}{\lambda} + \frac{1}{4}\right)\cos 2\pi\left(\frac{x}{\lambda} + \frac{1}{4}\right) = 2a \cos 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{L}{\lambda}\right)\sin 2\pi\frac{x}{\lambda}.$$

L'écart est *nul* si $\sin 2\pi\frac{x}{\lambda} = 0$, ou si $2\pi\frac{x}{\lambda} = 2K\frac{\pi}{2}$, d'où $x = 2K\frac{\lambda}{4}$.

Ces points sont les *nœuds*; leurs distances au fond sont 0, $\frac{2\lambda}{4}$ etc...

L'écart est *maximum* pour $\sin 2\pi\frac{x}{\lambda} = \pm 1$, ou pour $2\pi\frac{x}{\lambda} = (2K + 1)\frac{\pi}{2}$, d'où $x = (2K + 1)\frac{\lambda}{4}$; les *ventres* sont distants du fond de $\frac{\lambda}{4}$, $\frac{3\lambda}{4}$, etc...

Les résultats sont ceux de la méthode graphique.

Mesure indirecte de la vitesse du son dans les gaz au moyen des tuyaux sonores. — De la relation $V = n\lambda$, on déduit V en mesurant n avec la sirène, et λ sur le tuyau.

Prenons un tuyau long et étroit ayant pour fond un piston mobile P à tête graduée t (fig. 447). Faisons-lui rendre un harmonique supérieur dont nous déterminons la hauteur et poussons graduellement le piston en des nœuds (tranches immobiles) ; la hauteur du son redevient la même. Le déplacement du piston de N en N_1 ou de N_1 en N_2 mesure la distance $\frac{\lambda}{2}$ de deux nœuds consécutifs.

On peut encore procéder par comparaison. On fait rendre à un tuyau

ouvert un harmonique *de même ordre* dans l'air et dans un gaz. La subdivision étant indépendante de la nature du gaz,

$$L = 2k \frac{\lambda}{4} = 2k \frac{\lambda'}{4}.$$

λ et λ' sont les longueurs d'onde des deux sons;

on en déduit $L = 2k \frac{V}{4n} = 2k \frac{V'}{4n'}$; puis $\frac{V'}{V} = \frac{n'}{n}$ d'où $V' = V \frac{n'}{n}$.

n et n' fréquences des sons rendus par le tuyau vibrant dans l'air et dans le gaz, mesurées avec la sirène; V vitesse de propagation dans l'air, V′ dans le gaz (à la température de l'expérience).

On a V′ en multipliant par V le rapport $\frac{n'}{n}$.

l

N

N_1

P

N_2

Fig. 447.

INTERFÉRENCES DES SONS DE PÉRIODES DIFFÉRENTES

432. Quand deux vibrations, de même période, simultanées, suivent la même route dans le même sens et sont en même temps en concordance de phase, l'écart de la vibration résultante est constamment la somme des amplitudes respectives.

Si la période des deux mouvements vibratoires n'est pas rigoureusement la même, la concordance cesse peu à peu. Dans la représentation graphique, les ordonnées de même phase s'écartent progressivement; quand leur écart est d'une demi-période, les deux mouvements sont opposés et s'annulent. Lorsque les deux périodes ont des durées voisines T et T′, l'accord initial se prolonge assez exactement pendant quelques vibrations; il en est de même du désaccord qui a lieu pour un écart d'une demi-période. La répétition des accords et des désaccords produit des *renforcements* et des *extinctions* périodiques. L'accord se répète à un intervalle constant θ, lorsqu'un des sons a donné m vibrations et l'autre $m + 1$:

$$\theta = mT = (m + 1)\, T'$$

S'il y a p renforcements ou **battements** par seconde,

$$1 = p\theta = pm\, T = p\, (m + 1)\, T$$

posons $N = pm$, $N' = pm + p$, la différence $N' - N$ des nombres de vibrations des deux sons est p. Les battements sont *d'autant plus espacés* que p est plus petit ou que les deux notes sont *plus voisines*.

Si le nombre p des battements n'est pas très petit, leur succession donne l'impression d'un son appelé *son résultant*.

OPTIQUE

433. L'Optique est la branche de la Physique qui s'occupe des phénomènes produits par la lumière. La lumière provoque la sensation de la vision. Cette sensation comprend trois éléments : 1° elle est *forte* ou *faible;* 2° elle est *colorée* ou non; 3° elle permet de distinguer *la forme* et *la position* des objets.

Corps lumineux. — Les corps qui émettent de la lumière sont appelés *sources lumineuses* ou corps lumineux. Les uns sont lumineux par eux-mêmes (Soleil, étoiles, corps incandescents). Les autres sont *éclairés* et renvoient une lumière qu'ils ont reçue; c'est le le cas de la plupart des objets que nous voyons, c'est aussi le cas de la Lune et des planètes qui réfléchissent la lumière du Soleil.

Corps transparents, corps translucides, corps opaques. — Un corps *transparent* est un corps qui laisse passer la lumière et à travers lequel on distingue la forme des objets.

Un corps *translucide* (papier huilé, verre dépoli) se laisse traverser par la lumière et cette lumière le rend visible, mais il ne laisse voir ni les contours, ni la position des objets.

Un corps *opaque* (bois, papier noir, métaux) intercepte la lumière.

La transparence et l'opacité sont relatives. Elles dépendent de l'*épaisseur;* ainsi les métaux réduits en feuilles très minces sont plus ou moins transparents; l'air et l'eau, sous une forte épaisseur, absorbent la lumière en notable proportion. La transparence et l'opacité dépendent aussi de la *nature des rayons*. Les corps *transparents incolores* sont transparents pour toutes les couleurs, les corps *transparents colorés* ne sont transparents que pour certaines couleurs, ainsi un verre rouge absorbe les rayons verts.

PROPAGATION RECTILIGNE DE LA LUMIÈRE

434. *Dans un milieu homogène et transparent, la lumière se propage, en toute direction, en ligne droite.* — Pour le démontrer, on place, parallèlement, trois écrans opaques percés chacun d'une très petite ouverture et on dispose ces ouvertures B, C, D..., en ligne droite (fig. 448).

Si un point A d'une flamme se trouve sur la ligne des ouvertures,

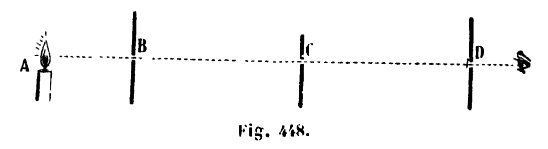


Fig. 448.

l'œil placé au delà de D aperçoit sa lumière. Qu'une seule ouverture s'écarte de la ligne des deux autres, la lumière est interceptée.

Une ligne droite suivie par la lumière est appelée **rayon lumineux.** On opère toujours sur un ensemble ou un *faisceau* de rayons. Dans un milieu homogène, un point lumineux est le point de départ ou d'arrivée de faisceaux *coniques*. Un cône de petite ouverture, issu d'un point lumineux très éloigné, est formé de rayons qui peuvent être considérés comme *parallèles;* ainsi, les rayons que nous recevons d'un point du Soleil sont parallèles entre eux.

La propagation rectiligne est surtout démontrée par ses conséquences ; elle explique les phénomènes observés dans la chambre noire et dans la formation des ombres.

435. Chambre noire. — Une *petite ouverture* étant pratiquée en O dans une paroi MN d'une caisse noircie intérieurement, une image des objets extérieurs se dessine sur un écran en verre dépoli PQ, disposé en face de l'ouverture.

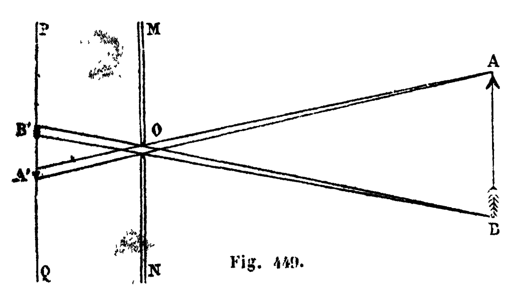


Fig. 449.

Traçons le faisceau conique qui a pour sommet un point A d'un objet et pour base le contour de l'ouverture.

L'écran PQ découpe dans ce cône une petite surface ; si l'ouverture O est assez étroite, un point A' de l'écran est le seul qui reçoive de la lumière d'un point A

d'un objet extérieur. De même B′ reçoit de la lumière du point B. Les points de l'objet compris entre A et B sont vus en des points de l'écran compris entre A′ et B′.

A′B′ est *l'image renversée* de l'objet AB (fig. 449), avec ses couleurs, *indépendante de la forme de l'ouverture* et d'autant plus nette que l'ouverture est plus petite et que l'objet est plus éloigné.

Si l'ouverture O est agrandie, l'intersection par l'écran du cône de sommet A a des dimensions sensibles ; les taches provenant des différents points de AB empiètent les unes sur les autres et l'image devient confuse.

Image du Soleil. — Si, dans une chambre obscure, on laisse pénétrer la lumière solaire par une petite ouverture O, le passage de la lumière est marqué par un cône lumineux à contours *rectilignes*, rendu visible par les poussières en suspension dans l'air. Chaque point de l'astre envoie sur l'ouverture un faisceau très étroit de rayons sensiblement parallèles qu'on peut réduire à son axe OA. La section par l'écran d'une surface conique, ayant le point O pour sommet et le contour du disque solaire pour directrice détermine la forme de l'image. Cette image est *circulaire*(1), si l'écran est perpendiculaire à la droite qui joint l'ouverture au centre du disque solaire ; elle est *elliptique* (en AA′) pour toute autre position de l'écran (fig. 450).

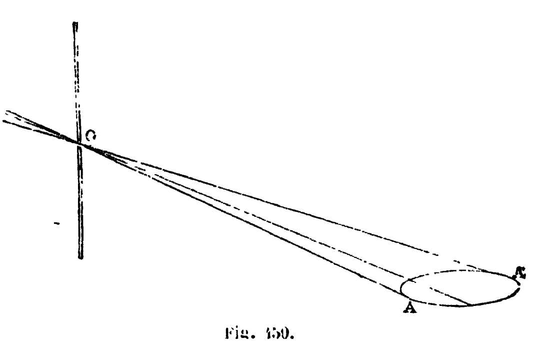


Fig. 450.

On s'explique d'après cela que les images formées sur le sol par les rayons solaires qui traversent les interstices des feuilles des arbres, soient rondes ou elliptiques suivant que la surface du sol est perpendiculaire ou oblique aux rayons. En cas d'éclipse, les images ont, comme le disque solaire, la forme de croissants ou d'anneaux.

436. Tracé géométrique des ombres. — Corps opaque devant un point lumineux. — Soit un point lumineux L, et un corps opaque AB. Par le point lumineux menons un *cône tangent* à la surface du corps opaque : aucun rayon venant de L ne pénètre dans

---

(1) **L'angle du cône de sommet O est égal à 32′ pour le soleil. Sur un écran normal au faisceau, distant de 2 mètres de l'ouverture O, le diamètre de l'image circulaire sera sensiblement un arc de cercle d'une longueur *d*, égale, en cm. à** $\frac{32.2\pi.200}{360.60}$.

ce cône au delà du corps opaque ; pour tout point m intérieur à ce cône, un rayon Lm est intercepté (fig. 451).

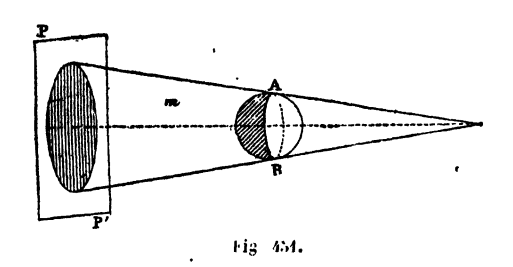


Fig. 451.

La surface du **cône d'ombre** sépare les points éclairés de ceux qui ne le sont pas. La trace du cône d'ombre sur un écran PP′ limite l'*ombre portée* par le corps sur l'écran.

Corps opaque devant une sphère lumineuse. — Si les dimensions de la source ne sont pas négligeables, le passage de la lumière à l'obscurité n'est plus brusque ; il y a, entre l'ombre et la partie éclairée, une région de transition dite **pénombre**, qui n'est éclairée que par une portion de la source.

Supposons que le corps éclairant O et le corps éclairé O′ sont deux sphères.

Ombre. — Le plan de la figure étant mené suivant la ligne OO′ des

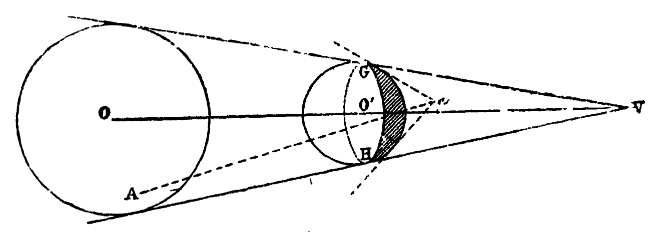


Fig. 452.

centres, une tangente extérieure commune aux deux cercles d'intersection des sphères par ce plan (fig. 452), rencontre en V la ligne des centres. Si l'on fait tourner la figure autour de OO′, la tangente décrit un cône qui est tangent extérieurement aux sphères. Les points tels que a, compris dans le cône d'ombre VGH, ne reçoivent aucune lumière ; en effet, la source est comprise dans le cône de sommet a mené tangentiellement à la sphère O′, et un rayon Aa, issu d'un point A de la sphère éclairante, est intercepté par la sphère opaque.

Pénombre. — On forme le cône TIJ (fig. 453), circonscrit intérieurement aux deux sphères, en faisant tourner autour de OO′ *la tangente intérieure commune* TI. Ce cône TIJ, limite, au delà de la sphère opaque O′, la région située dans la *pénombre*.

Soit, en effet, un point a' compris dans ce cône au delà de la

sphère opaque. Le cône, de sommet a', tangent à la sphère O', contient une partie de la source, qui n'éclaire pas a'; mais a' reçoit

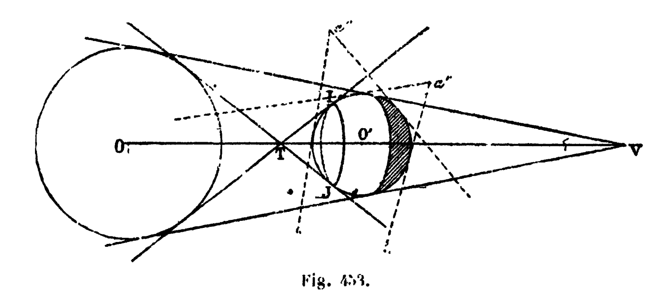


Fig. 453.

de la lumière des points de la sphère éclairante qui ne sont pas dans ce cône. On passe *par degrés* de l'ombre à la pleine lumière, car plus un point a' de la pénombre est voisin de l'ombre, plus faible est la partie de la source qui l'éclaire.

Un point a'', extérieur aux deux cônes circonscrits extérieurement et intérieurement aux deux sphères, est en pleine lumière, car le cône mené de a'' comme sommet, tangentiellement à O', laisse toute la source en dehors de lui; toute la sphère O éclaire a''.

Lorsque la sphère O' s'éloigne de la source, l'ouverture du cône de sommet T décroît et, pour une même distance de l'écran à la sphère O', l'épaisseur de la pénombre diminue. O et O' ne variant pas de position relative, si l'on rapproche l'écran de la sphère O', l'épaisseur de la pénombre diminue. Ainsi l'ombre portée sur un écran horizontal par une sphère exposée au soleil n'est entourée que d'une pénombre insensible si la sphère est voisine de l'écran.

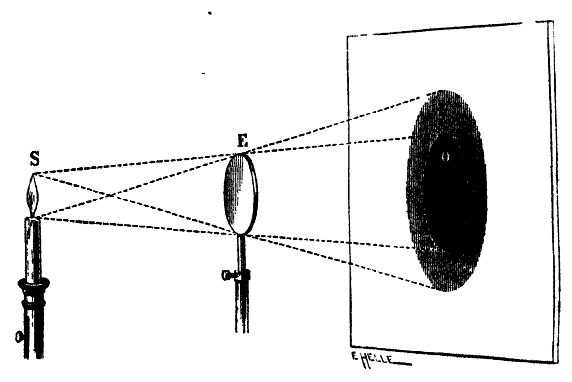


Fig. 454.

Si devant une bougie S, on place un écran vertical circulaire E

parallèle à un mur, on obtient, sur le mur, une ombre circulaire O entourée d'une pénombre P (fig. 454).

En lumière parallèle, il n'y a pas de pénombre.

Éclipses. — La théorie des ombres explique le phénomène astronomique des **éclipses.** Des corps opaques, tels que les planètes et leurs satellites, sont éclairés par le Soleil et entraînent dans leur mouvement de rotation leurs cônes d'ombre et de pénombre. D'une part, un satellite peut pénétrer dans le cône d'ombre de sa planète; d'autre part, le cône d'ombre du satellite peut balayer une partie de la surface de la planète. Dans les *éclipses de Lune,* la Lune passe dans le cône d'ombre de la Terre et cesse d'être visible. Dans les *éclipses de Soleil,* si le cône d'ombre de la Lune rencontre certains points de la Terre, le Soleil est entièrement invisible pour ces points. Aux points de la Terre qui sont situés dans le cône de pénombre, on observe une éclipse *partielle.* La Terre peut n'être rencontrée que par la seconde nappe du cône d'ombre de la Lune, il se produit alors une éclipse *annulaire* de Soleil.

VITESSE DE LA LUMIÈRE

437. La propagation de la lumière **n'est pas instantanée.** Deux observateurs inégalement distants d'une lumière qui apparaît à un moment donné, ne commencent pas à la voir au même instant *mathématique :* le plus rapproché la voit avant le plus éloigné; toutefois, sur la Terre, les distances sont trop petites pour qu'on puisse, comme pour le son, constater *directement* un intervalle entre l'instant où un phénomène lumineux a lieu et celui où il est perçu.

Le mouvement de propagation de la lumière est uniforme. — Dans le vide et dans l'air, la vitesse de propagation est sensiblement égale à 300.000 kilomètres par seconde (3.10^{10} cm.). Elle est donc près de un million de fois plus grande que la vitesse du son dans l'air. Comme la lumière ferait en une seconde sept fois et demie le tour de la Terre, on considère pratiquement sa vitesse comme infinie pour un espace de quelques kilomètres. Dans le vide, la vitesse de propagation est la même pour les lumières de diverses couleurs.

Dans les différents milieux homogènes transparents la lumière se propage avec une vitesse uniforme propre à chaque milieu.

Dans les milieux plus denses que l'air, la lumière se propage moins vite que dans l'air; en outre, la vitesse de propagation varie

avec la couleur. Pour les rayons jaunes, la vitesse dans le verre est les $\frac{2}{3}$ de la vitesse dans le vide ; la vitesse dans l'eau est les $\frac{3}{4}$ de la vitesse dans le vide.

MESURE DE LA VITESSE DE LA LUMIÈRE

1° *Méthodes astronomiques.* Au XVIIᵉ siècle, Rœmer a déduit des observations des éclipses du premier satellite de Jupiter le temps que la lumière met à parcourir le diamètre de l'orbite terrestre.

2° *Méthodes physiques.* Elles ont permis de mesurer le temps extrêmement petit que la lumière met à parcourir, à la surface de la Terre, une distance de quelques kilomètres (1).

438. Méthode astronomique de Rœmer. — La planète Jupiter met environ 12 ans à effectuer sa révolution autour du Soleil, tandis que la durée de la révolution de la Terre est d'une année.

Des satellites tournent autour de Jupiter, comme la Lune autour de la Terre. Les plans dans lesquels se meuvent Jupiter et ses satellites coïncident à peu près.

Le satellite le plus voisin de Jupiter (premier satellite) traverse à chacune de ses révolutions le cône d'ombre de Jupiter et devient quelque temps invisible. Le temps θ qui sépare deux *immersions* (débuts de deux éclipses consécutives), ou la durée de la révolution du satellite, est de 42 h. 22 min. 35 sec.

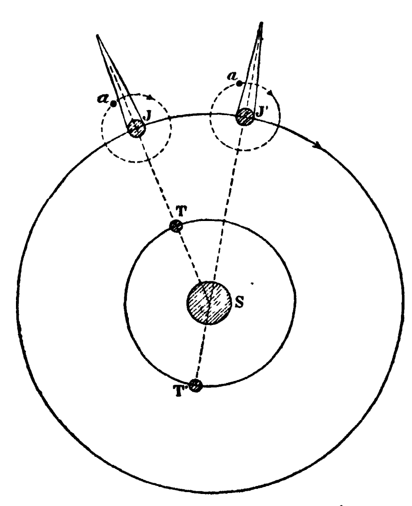


Fig. 455.

Ayant noté l'instant t d'une immersion, lorsque la Terre T est en *conjonction* avec Jupiter qui est en J (fig. 455), on peut calculer l'instant de la $(n+1)^e$ immersion qui devra avoir lieu lorsque la Terre T' sera en *opposition* avec Jupiter qui sera en J'. Cet instant

(1) Dans les méthodes astronomiques, le temps est mesuré avec précision, la connaissance des distances est moins certaine. Dans les méthodes physiques, la distance est rigoureusement établie, le temps, qui est extrêmement court, est difficile à apprécier exactement.

serait $t + n\theta$ si la Terre et Jupiter étaient à la même distance qu'au moment de la première immersion, mais à l'observation on constate un retard de plus de 16 minutes.

Ce retard mesure le temps que la lumière met à parcourir le diamètre de l'orbite terrestre. En effet, la Terre étant en T et Jupiter en J (à la conjonction), une première immersion a lieu au temps τ, elle est vue au temps $\tau + \frac{D}{V} = t$; D est la distance TJ et V la vitesse de la lumière. Une deuxième immersion a lieu au temps $\tau + \theta$, on l'observe au temps $\tau + \theta + \frac{D + \delta}{V}$, δ accroissement de la distance TJ. Une troisième immersion est vue au temps $\tau + 2\theta + \frac{D + \delta'}{V}$,...; la $(n + 1)^e$ (à l'opposition) au temps $\tau + n\theta + \frac{D + \Delta}{V}$; Δ diamètre de l'orbite terrestre.

L'intervalle de temps qui sépare les observations de la première et de la $(n + 1)^e$ immersion est $n\theta + \frac{\Delta}{V}$ au lieu d'être $n\theta$. Le retard est donc $\frac{\Delta}{V}$. Or $\frac{\Delta}{V} = 16^m 26^s$ ou 986^s.

On en déduit : $V = \frac{\Delta}{986}$. La distance Δ est connue (1).

439. Méthode physique de Fizeau. — Les expériences de Fizeau ont été effectuées, vers 1850, entre Suresnes et Montmartre; la distance des deux stations $\left(8 \text{ km. } \frac{1}{2}\right)$ est exactement connue.

Principe de la méthode. — A la station de Suresnes, un faisceau lumineux issu d'une lampe S était réfléchi en partie par une glace transparente G sans tain et envoyé horizontalement à travers un intervalle I compris entre deux dents d'une roue dentée R. Ce faisceau se propageait librement jusqu'à la station de Montmartre.

Là, un miroir M recevait le faisceau normalement à sa surface et lui faisait parcourir, au retour, le même trajet qu'à l'aller. Si la roue était restée immobile, le faisceau passait dans le même intervalle qu'au départ et arrivait à l'œil O d'un observateur placé derrière la glace. L'œil recevait la lumière de retour; *il ne voyait pas les rayons de départ* concentrés en I (fig. 456).

La roue est mise en mouvement autour de son axe par un mécanisme d'horlogerie. Si, pendant le temps que met le faisceau à se

(1) Approximativement $\frac{\Delta}{V} = 1000$, or $\Delta = 300.10^6$ km, d'où $V = 300.10^3$ km.

propager de Suresnes à Montmartre et à revenir à Suresnes, le plein d'une dent s'est substitué exactement au creux précédent,

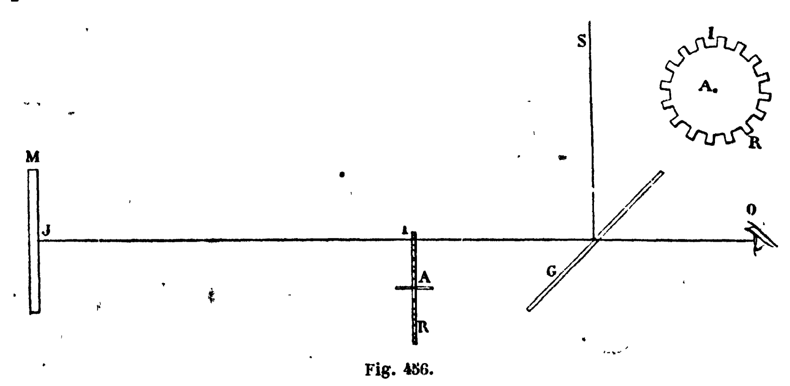


Fig. 456.

le faisceau est intercepté au retour. Il en est de même pour tous les faisceaux qui traversent les creux suivants, car les intervalles creux et les dents pleines de la roue sont des rectangles de même largeur. Pour cette vitesse de la roue, l'observateur ne reçoit plus alors aucune lumière de retour.

Désignons par n le nombre de tours de la roue en une seconde quand on obtient l'éclipse décrite, par p le nombre de dents; $2p$ est le nombre d'intervalles creux et pleins qui se succèdent en un tour de roue; $2pn$ intervalles passent en I en une seconde.

La fraction de seconde, $\frac{1}{2pn}$, nécessaire à la substitution d'un plein au creux qui le précède, est le temps que met la lumière à franchir dans l'air le double de la distance d des deux stations (aller et retour) (1). En une seconde, la lumière franchirait un espace $2pn$ fois plus grand ou $4pnd$. Cet espace est la vitesse de la lumière.

Apparences pour des vitesses croissantes de la roue. — Si la roue tourne d'abord très lentement, la lumière qui a traversé un creux au départ retrouve ce creux au retour. Quand une dent se substitue à un creux, le point lumineux de retour disparaît pour réapparaître au creux suivant. Si le nombre des alternatives par seconde dépasse 10, les impressions lumineuses se succèdent à un intervalle moindre que $0^s,1$ et la lumière de retour, bien qu'intermittente, paraît continue, en raison de la persistance des impressions sur la rétine.

La vitesse de rotation de la roue augmentant, on observe un affaiblissement progressif de la lumière. Quand l'éclipse est devenue complète,

(1) La roue dentée avait 720 dents; elle devait faire 12 tours et demi par seconde pour obtenir l'éclipse; $2pn = 18000$.

on maintient constante la vitesse de la roue et on mesure, avec un compteur de tours, le nombre de tours par seconde.

Expériences de contrôle. — Soit α le petit angle dont la roue a tourné pour qu'un plein se substitue à un vide pendant le temps de l'aller de la lumière de I en J et de son retour de J en I. Pour des vitesses de rotation 3 fois, 5 fois, 7 fois plus grandes, la roue, pendant le même temps, tourne d'angles 3α, 5α, 7α... ; la lumière qui a traversé un vide au départ est encore arrêtée par une dent à son retour (fig. 457) (1).

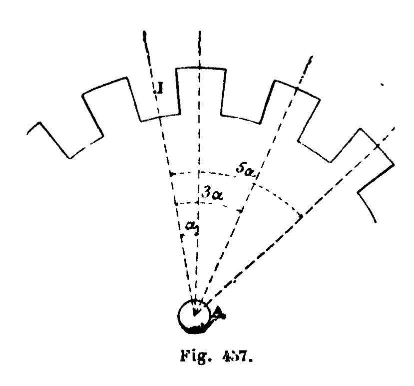


Fig. 457.

Chacune des éclipses qui correspondent aux angles de rotation α, 3α, 5α, 7α... permet une détermination de la vitesse V. Pour la k^e éclipse, la roue a tourné d'un angle $(2k-1)\,\alpha$ et le temps du double parcours est $(2k-1)\,\dfrac{1}{2pn}$ On a $V = \dfrac{4pnd}{2k-1}$; on prend la moyenne des diverses valeurs de V.

Détails complémentaires. — La source de lumière S, très petite et très éclairante, est disposée devant une lentille convergente l; ses rayons sont

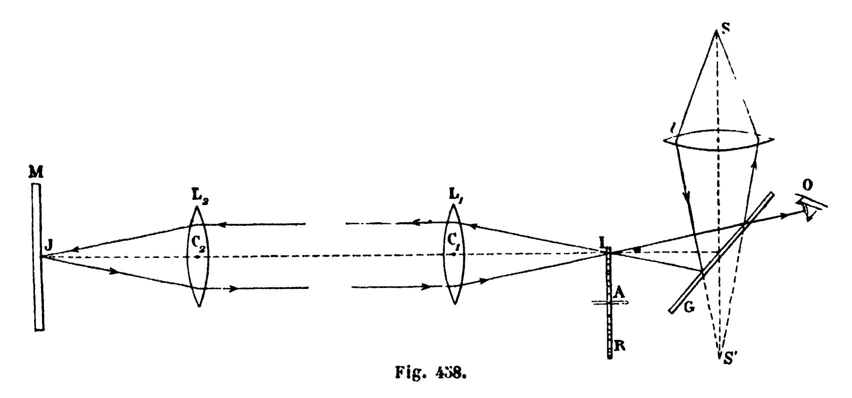


Fig. 458.

concentrés en partie en S'; la glace sans tain G, inclinée à 45° sur l'axe de la lentille l, réfléchit l'autre partie des rayons et une image de S se forme en I, symétrique de S' par rapport à la glace (fig. 458).

Le point I est dans le plan de la roue dentée et sur son pourtour. Quand il occupe un vide, les rayons concentrés en I continuent leur route en divergeant et tombent sur une lentille convergente L_1 de distance focale C_1 I. En sortant de cette lentille, les rayons forment un faisceau cylin-

(1) Pour des angles de rotation 2α, 4α, 6α... un vide prend la place d'un vide et l'observateur reçoit un maximum de lumière. Pour des angles intermédiaires, l'impression lumineuse est d'autant plus faible qu'on se rapproche davantage de 3α, 5α, 7α...

drique qui franchit la distance des deux stations sans trop s'affaiblir.

A la station de Montmartre, les rayons tombaient sur une lentille L_2 qui les concentrait en son foyer J sur la surface du miroir plan M. Les axes principaux des lentilles L_1 et L_2 étaient en prolongement et le miroir M était normal à l'axe commun.

Après réflexion en J sur M les rayons reprennent le même chemin qu'à l'aller et forment en I une image de retour. Ils tombent sur la glace sans tain si un vide se trouve en I et arrivent à l'observateur.

Résultats. — En perfectionnant dans quelques détails la méthode de Fizeau, Cornu a trouvé sensiblement 300 mille kilomètres.

PHOTOMÉTRIE

440. Quantité de lumière. — Une quantité de lumière est une grandeur mesurable. On définit l'égalité des quantités de lumière par l'égalité d'éclairement. *L'éclairement d'une surface* est la quantité de lumière qui tombe sur un cm^2 de cette surface. Deux quantités de lumière sont dites *égales* si elles produisent des *éclairements égaux* sur deux surfaces planes dans les mêmes conditions d'inclinaison. Une quantité de lumière A est 2, 3, 4... *n* fois plus grande qu'une autre B, si, dans les mêmes conditions, elle produit, le même éclairement que 2, 3, 4... *n* quantités de lumière égales à B.

La *photométrie* a pour objet la mesure des quantités de lumière. Cette mesure se fait avec des photomètres.

Intensité. — L'*intensité* ou le *pouvoir éclairant* d'une source lumineuse est la quantité de lumière que cette source envoie, pendant une seconde, sur une unité de surface recevant normalement la lumière et placée à l'unité de distance de la source.

Loi du carré des distances. — *La quantité de lumière reçue par une surface qui reçoit normalement les rayons varie en raison inverse du carré de la distance de la source.*

Cette loi, qui n'est applicable qu'à une lumière divergente, peut être démontrée directement. Considérons, en effet, différentes sphères concentriques ayant pour centre commun un point lumineux, la quantité totale de lumière émise par ce point parvient successivement sur chacune de ces sphères, par exemple sur une sphère de rayon 1 et sur une sphère de rayon 2. Sur cette dernière qui a une surface quadruple, un centimètre carré reçoit quatre fois moins de lumière qu'un centimètre carré de la première.

D'après la définition de l'intensité, la quantité totale de lumière

émise par une source est $4\pi I$. La fraction que reçoit une surface S éclairée normalement, qui intercepte un faisceau d'angle ω est ωI; si cette surface est à la distance D du point lumineux, sa grandeur est ωD^2, son éclairement est $\frac{\omega I}{\omega D^2} = \frac{I}{D^2}$. L'éclairement d'une surface éclairée normalement varie donc en raison inverse du carré de sa distance à la source.

441. Proposition fondamentale de la photométrie. — *Si deux sources qui éclairent normalement deux surfaces produisent un même éclairement, leurs intensités sont proportionnelles aux carrés de leurs distances respectives à ces surfaces.*

En effet, l'éclairement dû à la première source, à la distance D, est $\frac{I}{D^2}$, l'éclairement dû à la seconde source à la distance D′ est $\frac{I'}{D'^2}$. Si les éclairements sont égaux,

$$\frac{I}{D^2} = \frac{I'}{D'^2} \quad \text{ou} \quad \frac{I}{I'} = \frac{D^2}{D'^2}.$$

La proposition s'applique à deux surfaces égales, *éclairées sous une même inclinaison,* car ces surfaces ont pour projections des surfaces égales éclairées normalement et reçoivent la même quantité de lumière que celles-ci (1).

Pour comparer les intensités de deux sources, on *détermine les distances* D et D′ auxquelles on doit placer deux surfaces identiques pour qu'elles soient *également éclairées* sous la même inclinaison par chacune des deux sources. Les photomètres servent à constater cette égalité d'éclairement.

Photomètre de Bouguer (fig. 459). — Ce photomètre se compose d'un verre dépoli divisé en deux parties égales par une cloison à faces noircies qui lui est perpendiculaire. De part et d'autre de la cloison on place les deux sources; l'une d'elles, à une distance D,

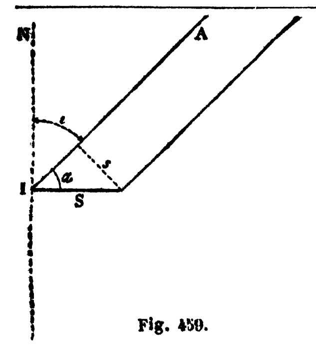


Fig. 459.

(1) *Influence de l'inclinaison sur l'éclairement.* — Soit une surface plane S recevant, sous un angle α, un faisceau cylindrique de direction IA. Appelons E et e les quantités de lumière que la surface S et la section droite s reçoivent par cm².

Les quantités totales de lumière reçues sont les mêmes sur S et s; $ES = es$,

$$\text{or } s = S \sin \alpha = S \cos i,$$

d'où $E = e \sin \alpha = e \cos i$, i angle de la normale à S avec la direction des rayons incidents. Donc, l'éclairement d'une surface S est proportionnel au cosinus de l'incidence.

éclaire exclusivement la partie A et l'autre, à la distance D′, la

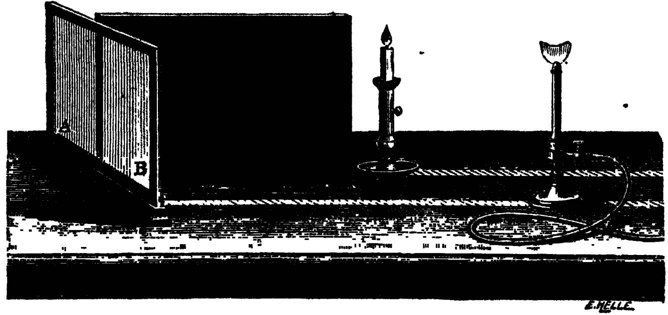


Fig. 459 *bis*.

partie B de l'écran. On fait varier D′ pour que les éclairements soient égaux.

Photomètre de Foucault. — Avec le photomètre de Bouguer, l'observateur placé derrière le verre dépoli voyait deux surfaces éclairées séparées par une étroite plage d'ombre due à la cloison. Dans le photomètre de Foucault, la cloison R est rendue mobile par le jeu d'un pignon et d'une crémaillère, et on règle sa position de façon à juxtaposer exactement les deux surfaces éclairées; l'ombre de séparation est réduite ainsi à une ligne géométrique I (fig. 460). La *juxtaposition* des surfaces rend leur comparaison beaucoup plus précise. Laissant immobile l'une des sources, on fait varier la distance de l'autre jusqu'à ce que l'éclairement des deux surfaces soit le même. L'écran est une lame mince translucide de porcelaine.

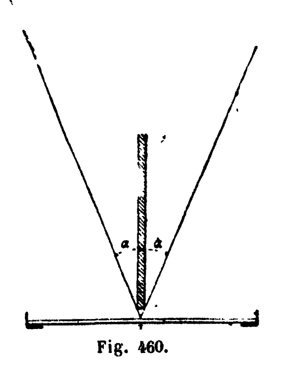


Fig. 460.

Photomètre de Bunsen. — Ce photomètre, d'un emploi simple, consiste en une feuille de papier blanc, tendue sur un cadre et présentant en son milieu une *tache translucide* faite avec un corps gras. Le cadre est placé perpendiculairement à la ligne SS′ qui joint les deux sources lumineuses (fig. 461), la tache est située sur cette ligne; elle *disparaît* et le papier paraît uniformément éclairé lorsque le cadre est à égale distance de deux sources égales. Cette disparition correspond à l'*égalité d'éclairement des deux faces* du papier. Si, à ce moment, on rapproche le cadre de S et si l'on place l'œil du côté de S′, la tache vue par transmission apparaît brillante

sur un fond sombre; en plaçant l'œil du côté de S, on voit une tache sombre sur un fond clair.

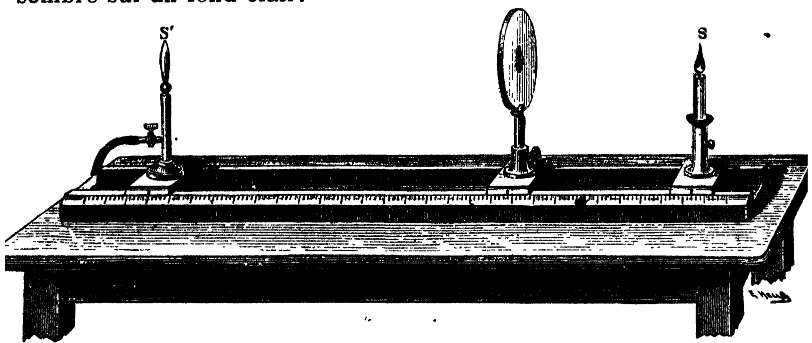


Fig. 461.

La source S, d'intensité I, étant à la distance D d'un côté de l'écran, et la source S', d'intensité I', à la distance D de l'autre côté, on a, pour l'égalité d'éclairement $\frac{I}{I'} = \frac{D^2}{D'^2}$.

On peut encore placer, d'un côté, une source *constante* R, à une distance invariable, et, de l'autre côté, la source S à une distance D convenable pour faire disparaître la tache. Laissant R fixe, on substitue S' à S : la tache disparaît à la distance D'. S et S' *produisant successivement le même éclairement sur une même surface,* pour la même position de l'œil; on a, $\frac{I}{I'} = \frac{D^2}{D'^2}$ (1).

442. Unité d'intensité. — Une unité longtemps adoptée a été l'intensité d'une lampe Carcel, de dimensions définies, brûlant à l'heure 42 grammes d'huile de colza épurée. On comparait, avec un photomètre, une source lumineuse à la lampe Carcel et on exprimait l'intensité en *carcels*. On a choisi une unité mieux définie, dite *absolue;* c'est l'intensité de la lumière envoyée, dans une direction normale, par un cm^2 de la surface d'un bain de platine incandescent amené à sa température de solidification (1775°) (2). Cette unité, proposée et évaluée par M. Violle, vaut 2,08 carcels.

---

(1) Dans les déterminations précédentes il n'a été question que de sources lumineuses *de même teinte.* Les mesures perdent toute valeur si les teintes sont nettement différentes; c'est le cas pour une lampe à incandescence et un bec Auer. Il est alors nécessaire de comparer, successivement, dans les deux sources, les diverses couleurs du spectre. On se sert, pour cette comparaison de *spectrophotomètres. Pour une même couleur,* les intensités de deux sources sont proportionnelles aux quantités de lumière qu'elles envoient par seconde, à une même distance, sur un cm^2 d'un écran.

(2) Le platine est fondu dans un creuset en chaux par la flamme d'un chalumeau à gaz oxhydrique.

On prend pour unité pratique la *bougie décimale* qui vaut un vingtième de l'unité absolue, sensiblement un dixième de carcel.

Unité d'éclairement. — L'unité pratique d'éclairement est la *bougie-mètre,* ou l'éclairement dû à une bougie décimale placée à un mètre de la surface éclairée.

Unité d'éclat. — L'*éclat* d'une source est le rapport $\frac{I}{s}$ de son intensité à la surface s d'émission. Pour deux foyers qui émettent la même quantité totale de lumière, celui qui a la plus petite surface est le plus éclatant. L'unité d'éclat est la *bougie décimale par cm².*

Propriétés des corps relativement à la lumière. — Un flux lumineux qui tombe sur un corps se divise en plusieurs parties : 1° une partie *réfléchie régulièrement;* 2° une partie *diffusée;* 3° une partie *réfractée;* 4° une partie *transmise;* 5° une partie *absorbée.*

RÉFLEXION

Quand un rayon lumineux tombe sur une surface plane polie, il est renvoyé dans une direction unique en avant du corps poli. C'est le phénomène de la **réflexion régulière**. On appelle *miroir* une surface qui réfléchit la lumière.

LOIS DE LA RÉFLEXION

443. On appelle *rayon incident* une direction rectiligne SI suivant laquelle la lumière tombe sur une surface; *rayon réfléchi,* la direction IR du rayon réfléchi; *plan d'incidence,* le plan du rayon incident SI et de la normale ou perpendiculaire IN à la surface au point d'incidence; *plan de réflexion,* le plan du rayon réfléchi et de la normale; *angle d'incidence,* l'angle de la normale et du rayon incident; *angle de réflexion,* l'angle de la normale et du rayon réfléchi. Ces deux angles varient de 0° à 90°.

Un rayon incident normal se réfléchit sur lui-même. Si l'incidence devient oblique, le rayon incident et le rayon réfléchi se trouvent de part et d'autre de la normale.

Lois de la réflexion. — 1° *Le rayon réfléchi reste dans le plan d'incidence;* le rayon incident SI, la normale au point d'incidence IN, et le rayon réfléchi IR sont dans un même plan (fig. 462).

2° *L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.* L'angle NIR est égal à l'angle NIS (1).

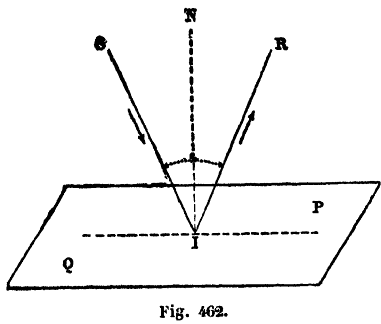


Fig. 462.

Vérification des lois de la réflexion. — Un trépied à vis calantes supporte un cercle vertical divisé muni de deux *alidades* F et E, ou rayons mobiles autour du centre du cercle (fig. 463). Chaque alidade porte un tube, fermé à chacune de ses extrémités par des plaques percées à leur centre d'une petite ouverture. Les axes de ces tubes décrivent un plan parallèle au plan du cercle divisé et se coupent en M au centre du cercle. Au centre du cercle divisé, est fixé un miroir métallique plan, dont la surface est perpendiculaire au diamètre MZ.

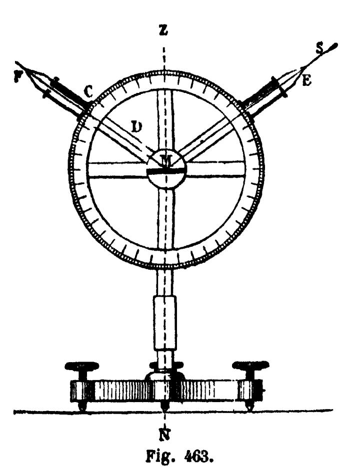


Fig. 463.

On dirige un rayon lumineux SE suivant l'axe de l'un des tubes. Ce rayon rencontre le miroir en M et se réfléchit. En faisant varier la deuxième alidade, on amène l'axe du deuxième tube CD à coïncider avec le rayon réfléchi. Le plan du rayon incident et du rayon réfléchi est alors le plan des axes des deux alidades, il contient la normale au point d'incidence qui est parallèle au diamètre MZ. La première loi de la réflexion est donc démontrée. Les angles EMZ, FMZ sont égaux ; c'est la seconde loi.

Réversibilité des rayons. — De la coïncidence des plans d'incidence et de réflexion et de l'égalité des angles d'incidence et de réflexion, résulte la *réversibilité des rayons* ou retour inverse dans la réflexion. On entend par là que, si un rayon incident EM se réfléchit suivant MF, un rayon FM se réfléchira suivant ME.

Vérification astronomique. — Les deux lois de la réflexion se vérifient avec une grande précision par un procédé astronomique.

Un cercle divisé de centre O est disposé *verticalement* au-dessus d'un bain de mercure MM' dont la surface libre constitue un miroir plan hori-

(1) En désignant par i l'angle d'incidence, la déviation du rayon est $180^0 - 2i$.

zontal (fig. 464). L'axe d'une lunette LI décrit un plan vertical parallèle au plan du cercle divisé. La lunette ayant la position IL, on vise une étoile E et on lit l'angle EOZ. On dirige ensuite la lunette suivant I'L en visant l'étoile par réflexion dans le bain de mercure. On lit l'angle ZOI'.

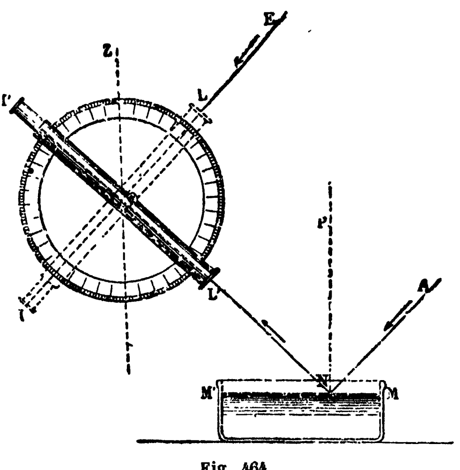


Fig. 464.

Le rayon EO et le rayon ON qui suivent l'axe de la lunette dans ses deux positions sont dans un même plan parallèle au plan du cercle. Comme ce plan est vertical et passe en N, il contient la normale NP au bain de mercure, il contient aussi la parallèle AN à EO. Vu l'éloignement de l'étoile, AN est parallèle à EI. Le rayon incident AN, la normale NP et le rayon réfléchi NI' sont donc dans un même plan normal à la surface réfléchissante.

Les angles ANP et EOZ, qui ont leurs côtés parallèles, sont égaux, il en est de même pour les angles PNO et ZOI'. Les angles mesurés EOZ et ZOI' étant égaux, l'angle d'incidence ANP et l'angle de réflexion PNO sont égaux.

Les lois de la réflexion se vérifient surtout par leurs conséquences et spécialement par les propriétés des miroirs.

MIROIRS PLANS

444. La surface d'un bain de mercure, un plan de verre ou de métal dressé et poli, sont des miroirs plans. Dans une glace d'appartement, la surface réfléchissante est une couche d'argent appelée *tain,* déposée sur la face arrière de la glace. *Un miroir plan donne d'un objet placé devant lui une image symétrique ayant les mêmes dimensions que l'objet.*

1° **Image d'un point.** — Soit un point lumineux A, un rayon incident *quelconque* AI et la normale IN au point I d'incidence. Abaissons de A sur le miroir une perpendiculaire AP, et prolongeons-la derrière le miroir. Le plan d'incidence AIN, normal à la surface réfléchissante, contient la perpendiculaire AP. Le rayon réfléchi IR, situé dans le plan d'incidence, coupe en A' la droite AP prolongée. Les deux triangles rectangles API, A'PI sont égaux, car leur côté

PI est commun et les angles en I (AIP et PIA′) sont égaux, l'un complémentaire de l'angle d'incidence et l'autre complémentaire de l'angle opposé par le sommet à l'angle de réflexion. Par suite A′P = AP (fig. 465).

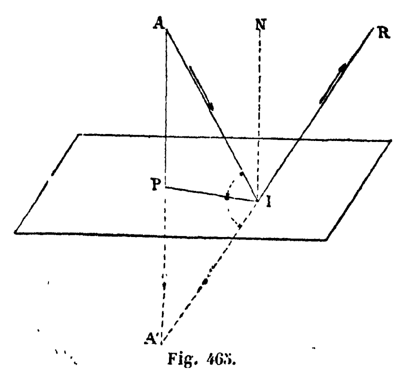


Fig. 465.

Puisque A′P = AP, quel que soit le rayon réfléchi, le point de rencontre A′ du rayon réfléchi avec la droite AP prolongée est un point d'où semblent partir tous les rayons réfléchis; A′ est l'**image** de A (fig. 465). L'image apparaît *derrière le miroir, à une distance égale à celle du point lumineux, sur la perpendiculaire abaissée de ce point sur le miroir*, en d'autres termes A′ est **symétrique** de A par rapport au miroir. L'image ne peut pas se former sur un écran, car elle n'est pas due au concours des rayons réfléchis eux-mêmes, mais au concours de *leurs prolongements;* elle est visible pour un œil recevant quelques-uns des rayons réfléchis, on la dit *virtuelle.*

2° **Image d'un objet.** — Les images des différents points de l'objet

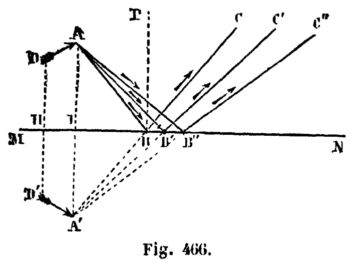


Fig. 466.

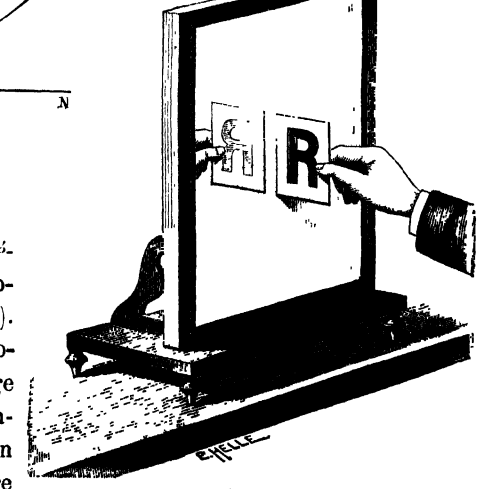


Fig. 467.

forment une *image symétrique de l'objet* par rapport au miroir (fig. 466).

L'image diffère de l'objet. Regardant son image dans un miroir et étendant son bras droit, un observateur voit l'image étendre son bras gauche. Une lettre R vue directement (fig. 467) dirigée de gauche à droite,

paraît par réflexion dirigée de droite à gauche. L'objet et son image *ne sont pas superposables.*

Champ d'un miroir plan pour une position de l'œil. — La partie de l'espace qui est visible après réflexion, forme le *champ* du miroir, *pour la position* O de l'œil.

Un point vu de O envoie sur le miroir un rayon qui passe en O après réflexion. Il semble donc venir du point O′ symétrique de O par rapport au miroir. Les points vus de O sont donc compris dans une pyramide qui a pour sommet l'image O′ du point O et pour directrice le contour du miroir (fig. 468).

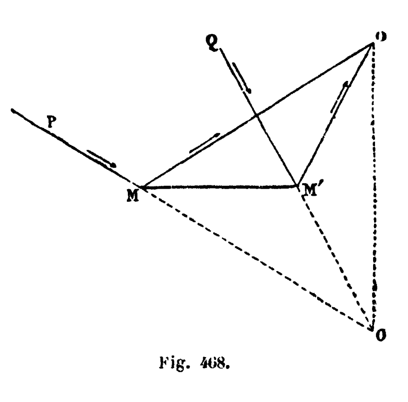


Fig. 468.

Le champ augmente si l'œil se rapproche du miroir.

Sextant. — Le sextant sert aux marins à déterminer *la distance angulaire* de deux astres ou la hauteur d'un astre au-dessus de l'horizon. Il se tient à la main et *une seule visée suffit* pour la mesure. Il se compose (fig. 469) d'un arc de cercle AB gradué sur 60 degrés et limité par deux rayons CA et CB. Sur le rayon CA est assujettie une petite lunette astronomique L dont l'axe optique est parallèle au plan de l'instrument; sur le rayon CB est fixé un petit miroir de verre N, à faces parallèles, perpendiculaire au plan de l'arc gradué. La moitié du miroir qui est voisine de l'arc gradué est argentée. Au centre C du cercle est fixé, sur une alidade CD (fig. 469 *bis*), mobile autour du centre, un second miroir M entièrement argenté, également perpendiculaire au plan du secteur et dirigé suivant le rayon CD qui l'entraîne. A son extrémité D, l'alidade est munie d'un vernier de la graduation.

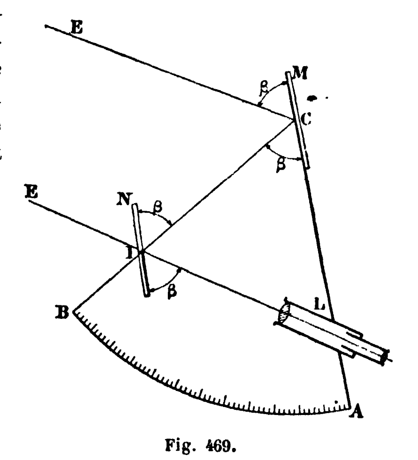


Fig. 469.

La ligne CI des centres des deux miroirs et l'axe optique de la lunette font en I le même angle avec le miroir N. Les deux miroirs sont parallèles lorsque le zéro de l'alidade, amenée sur le rayon fixe CA, coïncide avec le zéro de l'arc gradué (fig. 469 *bis*). Lors de cette coïncidence, si l'on vise une étoile E, on voit superposées, dans la direction EC :

l'image directe de E à travers la moitié non argentée du miroir N et son image après deux réflexions, l'une sur M et l'autre sur N.

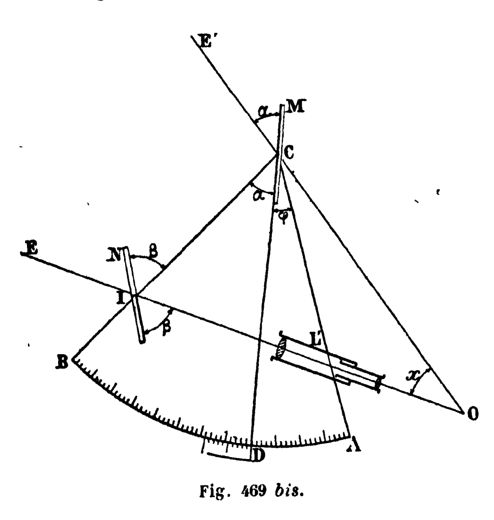


Fig. 469 *bis*.

Pour mesurer la distance angulaire x des étoiles E et E', on amène d'abord le plan du sextant, tenu avec une main, à contenir les deux points E et E'; on vise avec la lunette l'étoile E (fig. 469); maintenant l'œil sur E et le sextant restant immobile, on fait tourner avec l'autre main l'alidade et avec elle le miroir M jusqu'à ce que l'image de E', deux fois réfléchie, se place sur l'image directe de E; le rayon E' C réfléchi sur M, puis sur N par CI prend la direction IO parallèle à EI ou EC; on a alors $x = EOE' = 2ACD = 2\varphi$; on lit l'angle ACD (fig. 469 *bis*).

En effet, d abord, l'angle ACB ou $\beta = \alpha + \varphi$, ou $2\beta = 2\alpha + 2\varphi$; puis, dans le triangle ICO, on a EIC ou $2\beta = 2\alpha + x$ on en déduit $x = 2\varphi$.

445. Réflexions multiples sur deux miroirs plans parallèles. — Un objet lumineux O, placé entre deux miroirs plans parallèles, donne une *série indéfinie d'images situées sur la perpendiculaire commune abaissée de O sur les miroirs* (fig. 470).

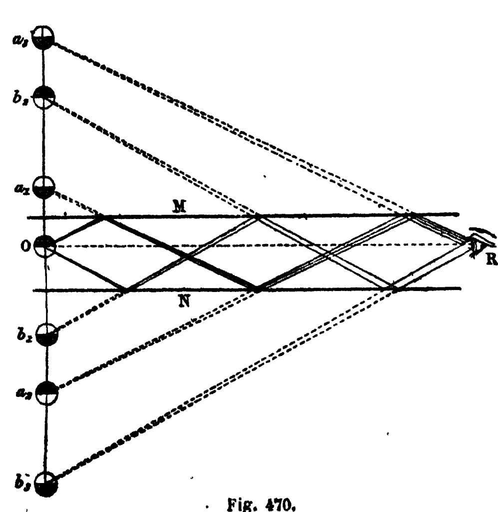


Fig. 470.

Un rayon issu de O et se réfléchissant en M, paraît après réflexion venir de a_1 symétrique de O par rapport à M; ce rayon se réfléchit ensuite sur N et vient après réflexion de a_2, symétrique de a_1, par rapport à N; puis il se réfléchit sur M et vient après réflexion de a_3, symétrique de

a_2 par rapport à M ; ainsi de suite. Une image donnée par un des miroirs se comporte comme un objet par rapport à l'autre miroir.

Un rayon issu de O, qui se réfléchit d'abord sur N, semble venir de b_1, symétrique de O par rapport à N ; après réflexion sur M, il semble venir de b_2, symétrique de b_1 par rapport à M ; réfléchi ensuite sur N, il vient de b_3, symétrique de b_2 par rapport à N, etc.

Un œil placé en R, entre les miroirs, reçoit des rayons ayant subi une, deux, trois... réflexions. Il voit les images successives ; leur nombre est illimité, mais les pertes de lumière par réflexion les affaiblissent à mesure que leur numéro d'ordre s'élève.

Les images des deux séries alternent les unes avec les autres. Elles sont *non superposables* à l'objet pour un nombre *impair* de réflexions (indices impairs), *superposables* pour un nombre *pair* (indices pairs).

D étant la distance des deux miroirs, g la distance de O au miroir M, h la distance de O au miroir N ; les distances aux miroirs des images successives sont :

g	distance de	a_1 à M	h	distance de	b_1 à N
$D+g$	—	a_2 à N	$D+h$	—	b_2 à M
$2D+g$	—	a_3 à M	$2D+h$	—	b_3 à N
$3D+g$	—	a_4 à N	$3D+h$	—	b_4 à M
$4D+g$	—	a_5 à M	$4D+h$	—	b_5 à N

Si nous remplaçons D par $g+h$, les distances à M des images successives vues par un observateur R tourné vers M sont :

$$g,\ g+2h,\ 3g+2h,\ 3g+4h,\ 5g+4h...$$

et les distances à N des images successives vues par réflexion sur N :

$$h,\ h+2g,\ 3h+2g,\ 3h+4g,\ 5h+4g...$$

La distance de deux images consécutives est alternativement $2h$ et $2g$.

446. Images sur deux miroirs inclinés. — Sur deux miroirs inclinés, on obtient un nombre *limité* d'images virtuelles.

Un objet lumineux O situé entre deux miroirs *rectangulaires* M et N (fig. 471) donne trois images : O′ par réflexion sur N, O_1 par réflexion sur M et O'_1 provenant de rayons réfléchis deux fois : sur N puis sur M, ou sur M puis sur N. Le point O et ses trois images

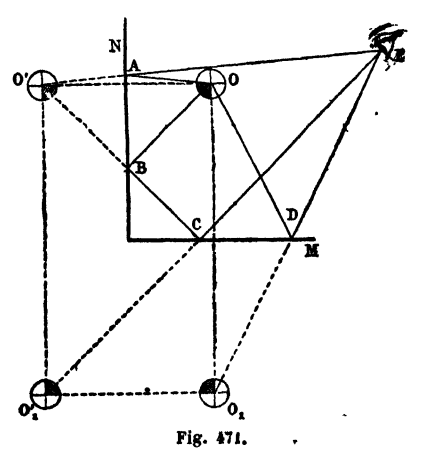


Fig. 471.

O′, O_1 et O'_1 forment les *sommets d'un rectangle* ayant son plan perpendiculaire à l'intersection des deux miroirs et son centre sur l'intersection [1].

Double réflexion entre deux miroirs inclinés. — Soient deux miroirs M et M′ faisant entre eux un angle aigu α et un rayon incident SI situé dans un plan perpendiculaire à l'intersection des deux miroirs. L'*angle* δ *du rayon incident* SI avec un *rayon* I′R′, *réfléchi* une fois sur chaque miroir *est égal au double de l'angle* α *des deux miroirs* (fig. 472).

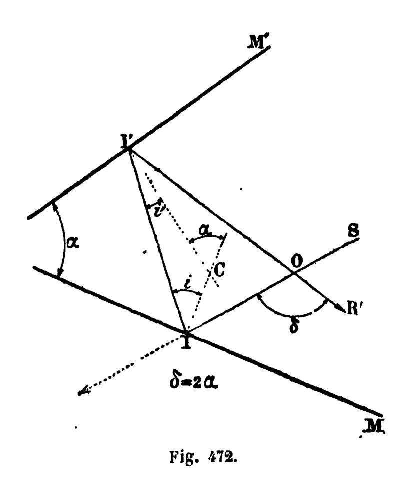


Fig. 472.

δ est un angle extérieur au triangle IOI′; α, angle aigu des normales, est un angle extérieur au triangle ICI′.

Or $\delta = 2i + 2i'$ et $\alpha = i + i'$, donc $\delta = 2\alpha$; si $\alpha = 45°$ on a $\delta = 90°$.

447. Miroir plan recevant des rayons convergents. — Si les rayons incidents SS′ *convergent* vers O′ [2] (fig. 473), le miroir les arrête avant leur point de concours et les rayons réfléchis se réunissent en O, symétrique de O′ par rapport au miroir. En effet, d'après la réversibilité dans la réflexion, un rayon incident SI quelconque, se réfléchit en IO, puisque OI se réfléchirait en IS. Le point O est le point de concours des rayons réfléchis.

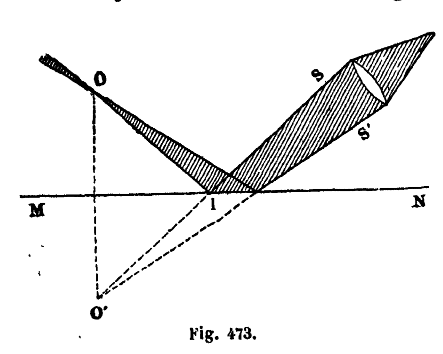


Fig. 473.

Le sommet O′ du faisceau incident est dit **virtuel**; le sommet O du faisceau réfléchi est **réel**, il peut être reçu sur un écran.

Un *objet virtuel donne, par réflexion sur un miroir plan,*

(1) Le nombre des images augmente si l'angle est inférieur à 90°; elles sont situées sur une circonférence dont le plan passe par le point lumineux et est perpendiculaire à l'intersection des deux miroirs; elle a son centre sur l'intersection. La formation des images par des miroirs inclinés est appliquée dans le *Kaléidoscope* où les deux miroirs font entre eux un angle de 60°.

(2) Un faisceau incident convergent s'obtient par réflexion sur un miroir concave ou par réfraction à travers une lentille convergente.

une image réelle, symétrique de l'objet par rapport au miroir.

Un faisceau incident *convergent* reste convergent après la réflexion; nous avions vu qu'un faisceau *divergent* restait divergent; un faisceau *parallèle* reste parallèle; la réflexion sur un miroir plan ne modifie donc pas la nature du faisceau incident.

448. Miroirs tournants. — Quand un rayon lumineux tombe sur un miroir plan qui tourne autour d'un axe fixe situé dans son plan et perpendiculaire au plan d'incidence, l'angle de rotation du rayon réfléchi est *double* de l'angle de rotation du miroir.

Les rayons réfléchis étant parallèles entre eux pour un faisceau de rayons incidents parallèles, il suffit de considérer un rayon incident OI qui passe par l'axe de rotation I (fig. 474). La normale et le rayon réfléchi tournent avec le miroir, en restant dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation. Le miroir tournant de α, de M en M′, la normale tourne aussi de α;

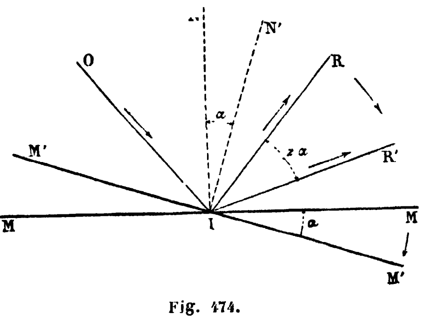


Fig. 474.

l'angle d'incidence OIN, égal à i, devient OIN′ ou $i + \alpha$; l'angle $2i$ du rayon incident OI et du rayon réfléchi IR devient $2(i + \alpha)$; le rayon réfléchi IR′ a ainsi décrit 2α, ou un angle double de l'angle dont a tourné le miroir.

Cette propriété est utilisée dans la mesure des petits angles.

Mesure optique des petits angles. — Soit MM_1 la trace sur un plan horizontal d'un miroir plan vertical, mobile autour d'un axe vertical qui se projette en son milieu I. En face du miroir, plaçons une échelle rectiligne, divisée, perpendiculaire à la droite qui joint son milieu O au centre I du miroir (fig. 475).

Le miroir étant dans la position MM_1, *parallèle à l'échelle*, un rayon lumineux normal OI reprend la direction IO après sa réflexion sur le miroir. Si le miroir est dévié d'un angle α et vient

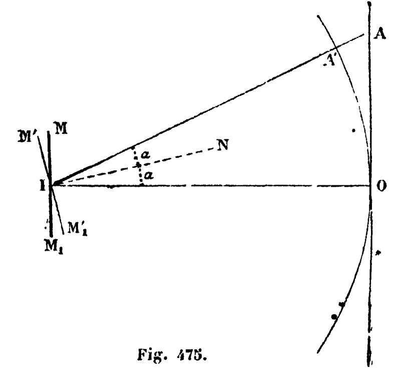


Fig. 475.

en $M'M'_1$ le rayon incident OI fait cet angle α avec la normale IN au miroir, le rayon réfléchi IA fait avec la normale le même angle α de l'autre côté et tombe en A sur l'échelle rectiligne.

$$AIO = 2\alpha \qquad tg 2\alpha = \frac{OA}{OI}.$$

Pour une très petite déviation, $OA = OA'$ et $OA = OI.2\alpha$.

Si $\alpha = 1°$, avec $OI = 1$ mètre, on a $OA = 100.2.\frac{2\pi}{360} = 3^{cm},5$.

La lecture de l'angle de déviation du miroir se fait de plusieurs façons : 1° une *lunette viseur* dont l'axe optique est dirigé suivant OI vise le point O avant toute déviation du miroir. Quand le miroir a tourné de l'angle α, le rayon lumineux reçu par réflexion suivant l'axe optique est A'I et $OA' = OI.2\alpha$; 2° une *lentille convergente* dont l'axe principal est OI est placée entre O et I, au voisinage du miroir, à une distance convenable d'une fente éclairée O pour qu'une image réelle du point O se forme sur la règle en O, avant toute déviation du miroir. Si le miroir tourne d'un angle α. une image réelle du point O se forme en A' ou en A et s'observe directement à l'œil; 3° le *miroir* MM_1 est *concave*, il a son centre de figure en I, et son centre de courbure en O; une fente lumineuse, en O, se réfléchit en I comme sur le plan tangent au miroir en ce point et donne, avant déviation, une image réelle en O. Quand le miroir a tourné de α l'image du point O est en A' ou A et $OA' = OI.2\alpha$.

449. Intensité de la lumière réfléchie. — Un miroir **métallique**, réfléchit la plus grande partie d'une lumière qu'il reçoit et la fraction réfléchie *varie peu avec l'incidence.*

Pour un miroir **transparent** (verre, eau), la fraction réfléchie *varie beaucoup avec l'incidence.* Si la surface est bien polie, ce qui n'est pas réfléchi traverse la substance. Sous une très petite incidence, la portion réfléchie n'est guère que 0,04 de la lumière incidente : le faisceau transmis comprend alors presque toute la lumière incidente. La proportion réfléchie croît avec l'incidence; le soir, sous une incidence très oblique, une vitre réfléchit les rayons solaires avec la même intensité qu'un miroir métallique.

450. Polarisation par réflexion. — Quand on fait tomber, sur un miroir de verre, un rayon lumineux provenant du Soleil ou d'une lampe, sous une incidence de 54°35', le rayon réfléchi acquiert, *sous cette incidence*, des propriétés nouvelles. Ces propriétés apparaissent nettement, si l'on fait usage d'un miroir en verre noir (on évite de cette façon la réflexion sur la seconde face).

Expérience des deux glaces noires. — Ayant fait tomber un rayon lumineux SO sur une première glace M, sous l'incidence de 54°35', on reçoit le rayon réfléchi OO' sur une seconde glace M', sous le même angle. Lorsque les deux plans d'incidence coïncident, on a un rayon réfléchi

comme à l'ordinaire. Si l'on fait ensuite tourner le miroir M' autour du rayon incident, sans changer l'incidence, l'intensité du faisceau réfléchi diminue à mesure que l'angle des deux plans d'incidence augmente : *elle est nulle* si *les plans sont rectangulaires* (fig. 476).

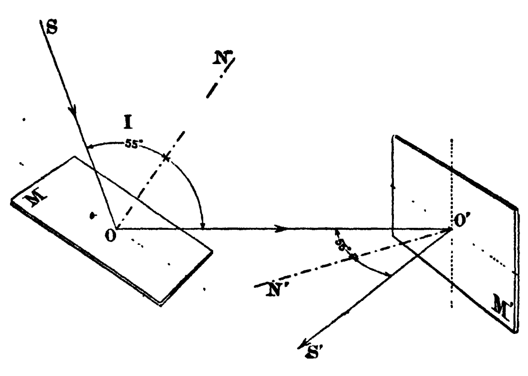


Fig. 476.

La lumière reçue par M est dite ***naturelle***. Le faisceau réfléchi sur M a pris des propriétés spéciales qui sont révélées par la réflexion sur M'; on le dit ***polarisé***

L'extinction du rayon reçu par le second miroir M' n'a lieu que si l'angle d'incidence sur les deux miroirs est 54°35'.

L'angle de 54°35' sur le verre est appelé ***angle de polarisation***; c'est un angle I tel que l'angle de réfraction correspondant r est égal à $90° - I$; on a donc $\frac{\sin I}{\sin r} = tg I = m$. Cette relation donne l'angle de polarisation par réflexion sur les diverses substances monoréfringentes. Pour l'eau $I = 52°45'$; pour le diamant, $I = 68°2'$.

Le miroir M est appelé *polariseur*, le miroir M' est dit *analyseur*.

RÉFLEXION IRRÉGULIÈRE OU DIFFUSION

451. Une surface *non polie*, telle qu'un mur blanc, ne renvoie plus les rayons lumineux dans une seule direction, mais dans tous les sens ; les aspérités de la surface se comportent comme de petits plans d'orientations très diverses (fig. 477). C'est par cette dissémination de la lumière, appelée **diffusion**, *que les corps éclairés sont visibles*.

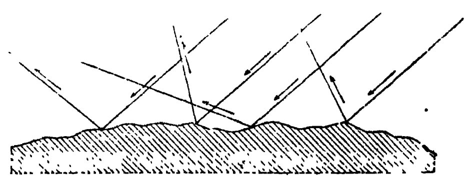


Fig. 477.

Un faisceau lumineux, dans un air pur, n'est visible que dans le prolongement du faisceau, mais si l'air contient des poussières en suspension, le trajet du faisceau est visible latéralement par diffusion.

Un observateur placé dans une chambre obscure et recevant des rayons solaires réfléchis sur un miroir parfaitement poli ne voit de

lumière que dans la direction de la réflexion régulière. Rien ne lui révèle l'existence du miroir et le changement de direction du faisceau lumineux. Le miroir devient visible, par diffusion, si on projette sur lui un peu de poussière.

MIROIRS SPHÉRIQUES

452. Les lois de la réflexion sur un plan s'appliquent à une surface courbe; la réflexion se fait alors sur un petit élément de surface confondu avec le **plan tangent** au point d'incidence.

Les miroirs courbes les plus usuels sont sphériques.

Miroirs sphériques. — Un *miroir sphérique* est une calotte sphérique polie (fig. 478). Le miroir est *concave* si la réflexion se fait sur la concavité; il est *convexe* si la réflexion a lieu sur la convexité. Le petit cercle qui limite le miroir est appelé *base*, la perpendiculaire abaissée du centre C de la sphère sur le cercle de base est l'**axe principal**. Le point d'intersection de l'axe principal et du miroir est le *sommet*. L'ouverture d'un miroir est l'angle sous lequel il est vu du centre de la sphère à laquelle il appartient.

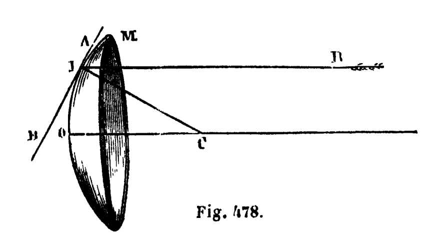


Fig. 478.

Le rayon réfléchi IR correspondant à un rayon incident SI (fig. 479) se construit en menant au point d'incidence I le rayon CI de la sphère qui est la normale au plan tangent en I; on trace dans le plan SIC une droite IR qui fait avec IN un angle égal à SIN.

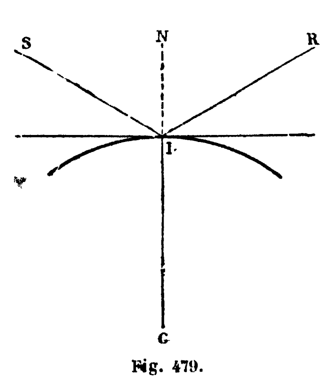


Fig. 479.

Un rayon incident NI *qui passe par le centre* C *de courbure* suit un rayon de la sphère et *revient sur lui-même* après réflexion.

MIROIRS CONCAVES

453. Foyer principal. — Des rayons lumineux, parallèles à l'axe principal d'un miroir concave de petite ouverture, se réunissent,

après réflexion, en un point unique F de cet axe, appelé *foyer principal, situé au milieu du rayon* CM (fig. 481).

Démonstration. Soit un rayon incident LI, parallèle à l'axe principal. Un plan passant par ce rayon et par l'axe, coupe le miroir

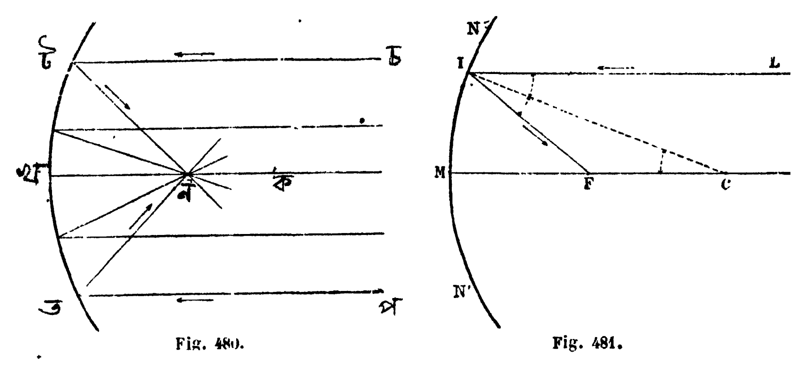


Fig. 480. Fig. 481.

suivant l'arc de grand cercle NMN'; c'est le plan d'incidence, car il contient le rayon incident LI et la normale CI au point d'incidence : le rayon réfléchi est dans ce plan et rencontre l'axe en F.

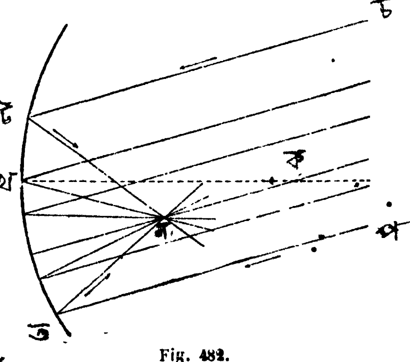
Les angles alternes-internes FCI et LIC sont égaux ; les angles LIC et FIC sont égaux comme angles d'incidence et de réflexion en I ; les angles FIC et FCI du triangle FIC étant égaux, ce triangle est isocèle, et FI = FC. Mais, pour une petite ouverture du miroir, FI est *sensiblement* égal à FM, et F est le milieu de CM quel que soit le rayon incident. $MF = \frac{R}{2} = f$ est **la distance focale principale**.

Un faisceau cylindrique parallèle à l'axe principal devient après réflexion, un faisceau conique de sommet F (fig. 480). Inversement, si un point lumineux F envoie sur le miroir un faisceau divergent, d'après la réversibilité, le faisceau réfléchi est parallèle à l'axe.

Ce résultat permet de porter au loin un faisceau lumineux cylindrique (lanternes des voitures, projecteurs de la marine).

Axes secondaires. — Tout diamètre de la calotte sphérique du miroir jouit des propriétés géométriques de l'axe principal ; on l'appelle *axe secondaire*.

Un faisceau de rayons parallèles donne, après réflexion, un faisceau


Fig. 482.

conique dont le sommet est sur son axe secondaire en F_1 à une distance $\frac{R}{2}$ du centre du miroir (fig. 482). F_1 est un **foyer secondaire.**

Plans focaux. — Les foyers secondaires se trouvent sur une petite calotte sphérique de centre C et de rayon $\frac{R}{2}$; pour des axes secondaires peu inclinés sur l'axe principal, cette calotte se confond avec son plan tangent en F ; ce plan, perpendiculaire à l'axe principal et mené par le foyer principal, s'appelle plan focal.

Un faisceau parallèle de direction quelconque converge après réflexion à l'intersection de son axe secondaire et du plan focal.

454. Foyers conjugués. — Des rayons issus d'un point lumineux P situé en face d'un miroir concave *de petite ouverture* vont, après réflexion, concourir en un point P'. L'*image* P' est située sur l'axe PC qui passe par le point P, puisqu'un rayon issu de P et passant par le centre de la sphère y revient après réflexion. P et P' sont dits *foyers conjugués* (fig. 483).

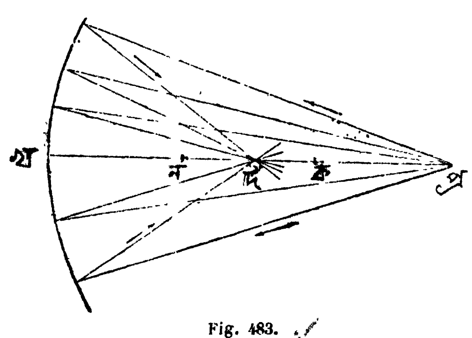


Fig. 483.

La dénomination de conjugués tient à ce que *chacun d'eux est l'image de l'autre;* en effet, des rayons lumineux issus de P', viennent, après réflexion, concourir en P, à cause de la réversibilité.

Construction du conjugué d'un point lumineux. — Le conjugué P' d'un point P s'obtient par l'intersection de deux rayons réfléchis : l'un d'eux est l'axe CP du point lumineux; on obtiendrait le second en menant du point P un rayon incident quelconque PI et en formant avec la normale CI, au point d'incidence, un angle de réflexion égal à l'angle d'incidence (fig. 484). Le conjugué P' est l'intersection de ce rayon réfléchi et de l'axe CP.

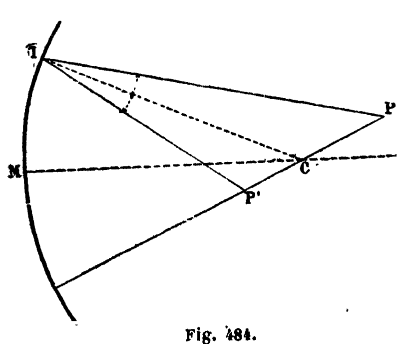


Fig. 484.

Les plans focaux donnent un second rayon réfléchi sans mesure d'angles. Soit un rayon incident quelconque PI; par le centre C

de la sphère, menons un rayon CF′, parallèle à PI (fig. 485), le point F′ où ce rayon rencontre le plan focal est le foyer secondaire du faisceau parallèle à PI, le rayon PI se réfléchit donc suivant IF′; le point de rencontre P′ de IF′ et de PC est le conjugué cherché.

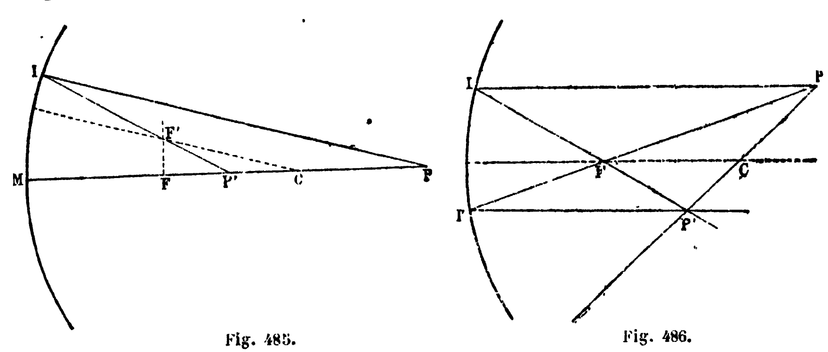


Fig. 485. Fig. 486.

Cette construction convient à tous les cas, que le point P se trouve sur l'axe principal ou sur un axe secondaire.

Si le point P n'est pas sur l'axe principal, on mène habituellement un rayon incident PI parallèle à l'axe principal; ce rayon, après réflexion, va passer par le foyer principal F; l'intersection du rayon réfléchi IF et de l'axe secondaire CP donne P′ (fig. 486). — On peut aussi mener PF, ce rayon se réfléchit en I′ parallèlement à l'axe principal, son intersection avec l'axe secondaire est P′.

455. Image d'un objet. — On obtient l'image P′N′ d'un objet PN par la construction des foyers conjugués des différents points.

Image d'une droite perpendiculaire à l'axe principal. — Lorsque l'objet est une petite droite PN perpendiculaire à l'axe principal, il suffit de déterminer le conjugué d'un seul point, car l'image est une *droite* également *perpendiculaire* à l'axe principal.

Fig. 487.

Démonstration. — Dans le plan de l'axe principal et de la droite PN, construisons le conjugué P′ d'un point P; puis, abaissons de P′ une perpendiculaire P′N′ sur l'axe principal (fig. 487).

Posons $NM = p$, $N'M = p'$, $MF = f$.

PN est égal à la perpendiculaire IM_1, abaissée du point I sur l'axe ; pour un miroir de petite ouverture M et M_1 se confondent.

1° Les triangles rectangles IMF, P'N'F, de sommet F, sont semblables; par suite : $\frac{P'N'}{IM}$ ou $\frac{P'N'}{PN} = \frac{FN'}{FM} = \frac{p'-f}{f}$.

2° Un rayon incident PM passant par le centre de figure M et le foyer conjugué P' se trouve à l'intersection du rayon réfléchi MP' et de l'axe secondaire PC; les angles PMC, P'MC sont égaux. Les triangles rectangles semblables PNM, P'N'M donnent :

$$\frac{P'N'}{PN} = \frac{MN'}{MN} = \frac{p'}{p}.$$

3° Égalons les deux valeurs de $\frac{P'N'}{PN}$: On a $\frac{p'-f}{f} = \frac{p'}{p}$

d'où $p'f + pf = pp'$. En divisant par $pp'f$: $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$.

Si p est constant, p' l'est aussi. Or p étant le même pour tout point d'une droite PN perpendiculaire à l'axe, l'image d'un point de cette droite se trouve sur la droite P'N' dont le pied est distant de p' du sommet M. Tout point P de PN a donc son image en P' sur P'N'. Les deux droites PN et P'N' sont dites *conjuguées* (1).

Positions et grandeurs de l'image. — Les triangles PNM et P'N'M donnent toujours $\frac{P'N'}{PN} = \frac{p'}{p}$. Une seconde valeur de $\frac{P'N'}{PN}$ se déduit des triangles semblables IMF, P'N'F de sommet F.

I. **Droite réelle, au delà du foyer principal**. — D'après la construction, l'image est *réelle* et *renversée* (fig. 488).

$$\frac{P'N'}{PN} = \frac{FN'}{FM} = \frac{p'-f}{f}$$

$$\frac{p'}{p} = \frac{p'-f}{f}$$

d'où $p'f + pf = pp'$

et $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$ (2)

Fig. 488.

(1) *Image d'un plan perpendiculaire à l'axe principal.* — En faisant tourner le plan de la figure autour de l'axe principal, les droites PN, P'N' engendrent deux *plans conjugués* perpendiculaires à l'axe principal. Tout point de l'un a son image sur l'autre.

Pour construire l'image d'un plan perpendiculaire à l'axe principal, il suffira donc de chercher l'image P' d'un point P, et d'abaisser de P' un plan perpendiculaire à l'axe.

(2) On obtient cette relation par des formules plus symétriques en utilisant les deux

Il y a lieu de considérer les positions suivantes de la droite : 1° au delà du centre du miroir (image inférieure à l'objet) ; 2° au centre (image égale à l'objet) ; 3° entre le centre et le foyer principal (image plus grande que l'objet) ; 4° au foyer principal (image infinie).

II. **Droite réelle, entre le foyer et le miroir.** — L'image est *droite*, *virtuelle*, plus grande que l'objet (fig. 491).

$$\frac{P'N'}{PN} = \frac{FN'}{FM} = \frac{p'+f}{f}$$

$$\frac{p'}{p} = \frac{p'+f}{f};$$

d'où $p'f - pf = pp'$

et $\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}.$

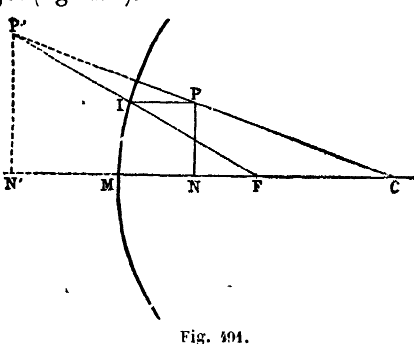


Fig. 491.

Le point de concours P', *virtuel*, n'est pas visible sur un écran. Si la droite PN est dans le plan tangent au miroir en M, l'image est dans le même plan, droite et égale à l'objet.

Si du point P' on mène un cône qui a pour base le contour de la pupille, en joignant au point P les points d'intersection de ce cône avec le miroir, on obtient les rayons issus de P, que l'œil reçoit après la réflexion (fig. 492).

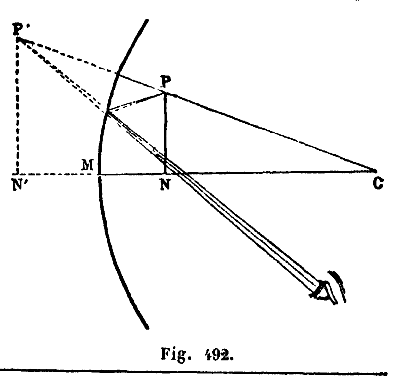


Fig. 492.

III. **Droite virtuelle, en arrière du miroir.** — L'objet PN serait une image réelle formée

---

constructions d'un conjugué P', et en considérant les triangles IMF, et II'P' et les triangles I'MF et II'P (fig. 490).

$$IM = PN = O\ (\textit{objet});$$
$$I'M = P'N' = I\ (\textit{image}).$$

1° Triangles semblables I'MF; II'P'.

$$\frac{IM}{II'} = \frac{MF}{I'P'} \text{ ou } \frac{O}{O+I} = \frac{f}{p'}\ \textbf{(1)}.$$

2° Triangles semblables I'MF, II'P.

$$\frac{I'M}{II'} = \frac{MF}{IP} \text{ ou } \frac{I}{O+I} = \frac{f}{p}\ \textbf{(2)}.$$

Ajoutons **(1)** et **(2)**

$$\frac{O+I}{O+I} = 1 = \frac{f}{p} + \frac{f}{p'} \text{ et } \frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'}$$

Les autres cas se traitent avec les mêmes triangles.

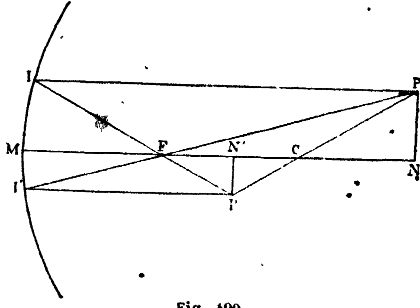


Fig. 490.

par des rayons convergents; l'interposition du miroir M empêche sa formation, mais les rayons incidents ont la même direction que si elle existait; l'objet PN est dit *virtuel* par rapport au miroir M. L'image P'N' est *droite, réelle,* plus petite que l'objet (fig. 493)

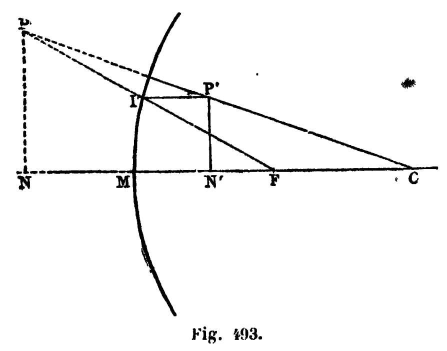


Fig. 493.

$$\frac{P'N'}{PN} \quad \frac{FM}{FN} = \frac{f}{f+p}.$$

$$\frac{p'}{p} = \frac{f}{f+p};$$

d'où $pf - p'f = pp'$

et $\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f}.$

La figure 494 représente un faisceau dont les rayons se réuniraient au point P sans l'interposition du miroir : après réflexion, ils convergent en P'.

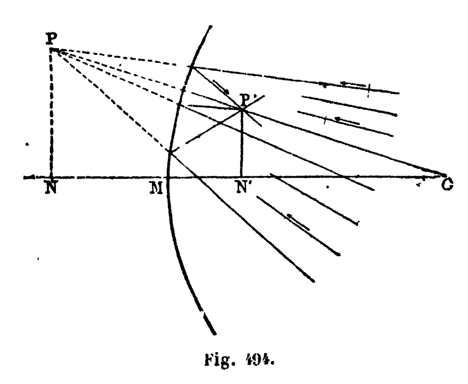


Fig. 494.

456. Remarques générales. — L'objet et l'image sont, dans chaque cas, à la fois du même côté du foyer; du centre du miroir ils sont vus sous un même angle du centre du miroir.

Les pieds N et N' d'une droite et de son image étant conjugués, la relation établie entre p et p' fait connaître les variations de position de l'image d'un *point lumineux* qui se déplace sur l'*axe principal*. Les mêmes relations s'appliquent à deux points conjugués situés sur un *axe secondaire*, peu incliné sur l'axe principal.

Les trois équations qui déterminent la position d'un conjugué :

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{f}, \qquad \frac{1}{p}-\frac{1}{p'}=\frac{1}{f}, \qquad -\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{f}$$

sont trois relations arithmétiques entre des longueurs positives. En comparant les positions de P et de P' aux signes de p et p', on voit que le signe + s'applique à des points de concours réels et le signe — à des points de concours virtuels. Les trois équations se déduisent d'une seule $\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{f}$; p et p' ont le signe + ou — suivant qu'ils se rapportent à un point de concours réel ou virtuel.

Formule générale. — La règle précédente donne la relation arithmétique pour chaque cas, quand la construction géométrique est faite. Par une convention habituelle en algèbre, on remplace les trois relations par une seule qui comprend tous les cas.

Prenant le sommet M pour origine, on compte positivement les segments p et p' *situés en avant du miroir ou du côté de la lumière incidente :* on compte négativement les segments *situés en arrière du miroir.*

Avec cette convention, la relation unique $\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{f}$ donne la valeur de p' et fait connaître la *position du conjugué sans construction géométrique*, quand p varie de $+\infty$ à $-\infty$, sur tout un axe.

On en déduit $p'=\frac{pf}{p-f}$. D'autre part $\frac{I}{O}=\frac{p'}{p}$

$$\text{quand } p=+\infty,\quad p'=f \text{ et } \quad I=\frac{O}{p}f$$ (1).

A une valeur positive de p' correspond une image réelle, située devant le miroir. Si l'on trouve une valeur négative pour p', l'image est virtuelle et semble se former derrière le miroir.

L'image est *renversée* quand $\frac{p'}{p}$ est positif, *droite* si $\frac{p'}{p}$ est négatif.

Le point lumineux et son image marchent constamment en sens inverse; ils se rencontrent deux fois, au centre et au sommet (pour $p=R$ et pour $p=0$).

Formule de Newton. — Il est parfois commode de compter les distances de l'objet et de son image à partir du foyer principal F ;

$$\text{posons } FM=f,\quad NF=\varpi,\ N'F=\varpi'$$

Dans le cas où l'objet est une droite réelle située au delà du foyer principal, la relation $pf+p'f=pp'$ devient :

$$(\varpi+f)f+(\varpi'+f)f=(\varpi+f)(\varpi'+f)$$
$$\text{ou } \varpi\varpi'=f^2.$$

Cette équation convient à tous les cas et se discute aisément.

457. Vérifications expérimentales. — Dans une chambre obscure, la flamme d'une bougie est disposée en avant d'un miroir concave, au delà du foyer, et l'on reçoit les rayons réfléchis sur un écran. Si l'écran est placé dans le plan focal conjugué de l'objet, il s'y

---

(1) φ étant le diamètre apparent de l'objet, $\frac{O}{p}=tg\varphi$. Pour le soleil ou une planète (fig. 495), φ est très petit, et l'on peut écrire : $I=f\varphi$. La grandeur de l'image SS, qui se forme dans le plan focal, est égale au produit de la distance focale par le diamètre apparent de l'astre exprimé en radians. Pour le soleil, dont le diamètre apparent est de 32′,

$$\varphi=\frac{2\pi.32}{360\times 60}=0{,}009;\ I=f\times 0{,}009.$$

Fig. 495.

forme une image nette de la flamme (fig. 496). L'image se trouble

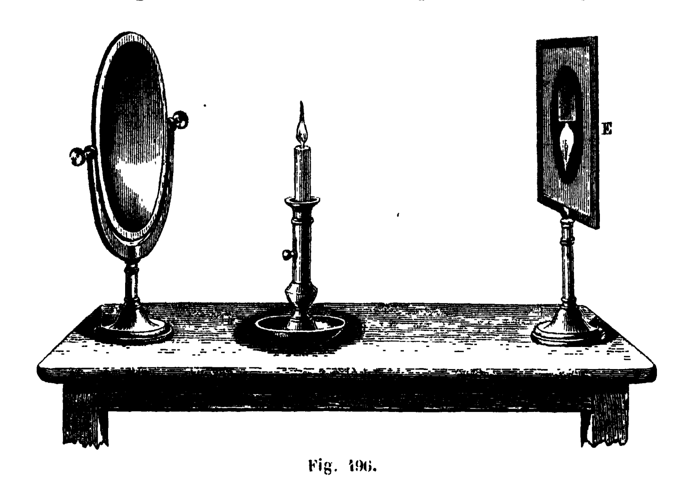


Fig. 496.

quand l'écran est en dehors de ce plan, car les faisceaux coniques dont les sommets sont dans le plan conjugué coupent alors l'écran suivant des cercles qui empiètent les uns sur les autres.

Variations de la position et de la grandeur de l'image. — Quand la bougie est très loin, une petite image renversée de la flamme se dessine au foyer : à mesure que la bougie se rapproche, l'image grandit et s'éloigne du miroir. *Au centre* l'image est égale à l'objet et elle est ***symétrique*** de l'objet par rapport à l'axe principal. Si la bougie passe entre le centre et le foyer, l'image renversée se produit au delà du centre et elle est plus grande que l'objet. Lorsque la bougie atteint le foyer, l'image est infiniment grande et rejetée à l'infini.

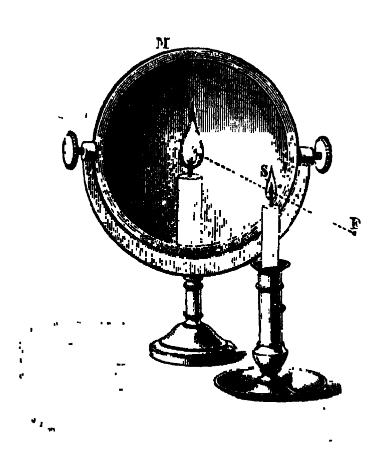


Fig. 497.

Si la bougie se trouve entre le foyer et le miroir (fig. 497), on ne peut plus recevoir d'image sur un écran, mais en plaçant l'œil en avant du miroir sur le trajet des rayons réfléchis, on voit, en arrière du miroir, une image virtuelle de la bougie, droite et agrandie.

Une image réelle peut être vue *directement* aussi bien qu'une image virtuelle. En effet (fig. 483), les rayons réfléchis qui forment l'image réelle d'un point P, divergent après leur point de concours P'. Un œil placé *dans le cône des rayons divergents* voit le point P' comme un point lumineux matériel, avec cette différence que l'image *aérienne* A' n'envoie pas de lumière dans toutes les directions.

Une image réelle, reçue sur un écran, *diffuse sa lumière en tous sens,* et devient visible, pour toute position de l'observateur.

Une petite portion d'un miroir donne une image de même position et de même grandeur qu'une portion plus grande; l'image est moins lumineuse, si elle est formée par un moindre nombre de rayons réfléchis.

458. Mesure de la distance focale d'un miroir sphérique concave. — On expose le miroir aux rayons solaires et on déplace sur l'axe principal un petit écran sur lequel on cherche à obtenir une image du disque solaire aussi nette et aussi petite que possible. La distance de l'image au miroir est la distance focale *f*.

Il est plus précis de promener en avant du miroir, sur l'axe principal et perpendiculairement à cet axe, une ouverture percée dans un écran et vivement éclairée; quand on a trouvé une image nette de l'ouverture, **égale à l'objet** et dans le même plan perpendiculaire à l'axe, l'écran passe par le **centre du miroir**. La distance focale *f* est alors la moitié de la distance du miroir à l'écran.

MIROIRS CONVEXES

459. Foyer principal. — Des rayons lumineux, parallèles à l'axe principal d'un miroir sphérique convexe, divergent après leur réflexion sur le miroir; leurs prolongements rencontrent l'axe en un point F situé, derrière le miroir, *à égale distance du centre* C *de la sphère et du sommet* M *du miroir*. Ce point est le *foyer principal.*

Soit un rayon incident LI *parallèle à l'axe*. Un plan passant par ce rayon et l'axe principal contient la normale CI : c'est donc le plan d'incidence, et il contient le rayon réfléchi. Le rayon réfléchi, prolongé derrière le miroir, rencontre l'axe en F (fig. 498).

Le triangle CIF est isocèle. En effet, par suite du parallélisme de CM et de IL, l'angle C du triangle et l'angle d'incidence en I du rayon LI sont égaux; d'autre part, l'angle du triangle en I et l'angle de réflexion en I sont égaux comme opposés par le sommet. Les deux angles du triangle en C et en I sont donc égaux, et FI = FC.

Si l'*ouverture du miroir est très petite,* FI est sensiblement égal à FM et F est *sensiblement* au milieu de MC. Un faisceau parallèle

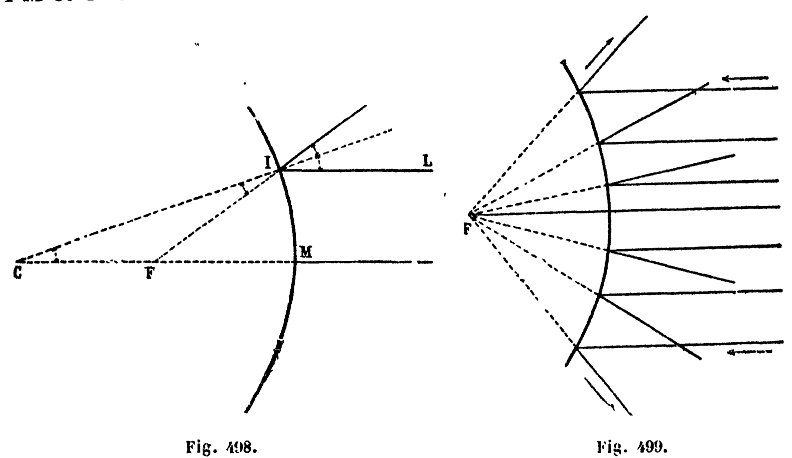


Fig. 498. Fig. 499.

à l'axe forme ainsi, après réflexion, un cône divergent de sommet F (fig. 499). L'œil placé dans le faisceau réfléchi voit, en F, un point de concours virtuel qui ne peut pas être reçu sur un écran.

Par suite de la réversibilité, un faisceau incident qui converge vers le foyer principal F, est transformé, après la réflexion, en un faisceau parallèle à l'axe principal.

Axes secondaires. Plan focal. — Les rayons réfléchis d'un faisceau incident parallèle à un axe secondaire, c'est-à-dire à un diamètre du miroir, ont un point de concours virtuel F. Le lieu de ces foyers secondaires est une calotte sphérique, concentrique au miroir et de rayon moitié. Pour un miroir de petite ouverture, on peut confondre cette calotte avec un plan, mené par le foyer principal perpendiculairement à l'axe principal. Ce plan est appelé *plan focal.*

Tout rayon incident dont la direction passe par un point F′ du plan focal se réfléchit parallèlement à l'axe secondaire qui passe par le point F′.

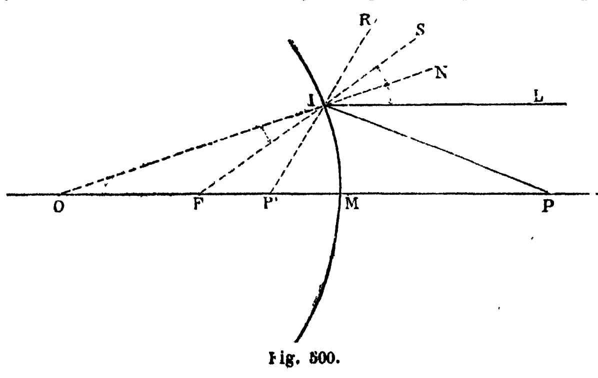


Fig. 500.

460. Foyers conjugués. — Des rayons issus d'un point P semblent, après réflexion sur un miroir convexe, provenir d'un point P′ situé sur CP ; P et P′ sont *conjugués* (fig. 500).

Construction du conjugué d'un point lumineux. — On construit l'image P′ d'un point lumineux P par l'intersection de deux rayons réfléchis : l'un est l'axe qui passe en P (fig. 501). Pour obtenir un

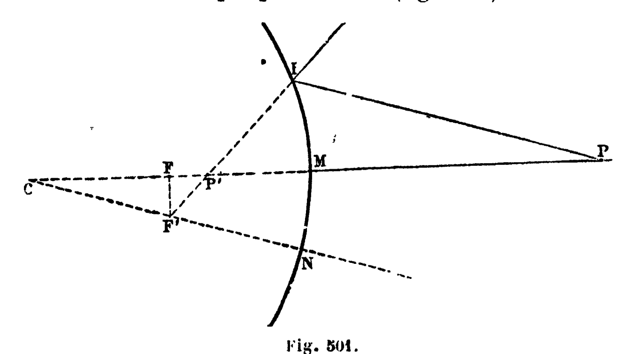


Fig. 501.

second rayon réfléchi, on mène par P un rayon incident quelconque PI et, par le centre de la sphère, un rayon parallèle CN ; CN est l'axe secondaire d'un faisceau incident parallèle à PI.

L'intersection F′ de CN et du plan focal est le foyer secondaire du faisceau. Tous les rayons réfléchis du faisceau passant en F′, IF′ est la direction du rayon réfléchi correspondant au rayon incident PI. Son intersection P′ avec l'axe PC est le conjugué de P.

Quand le point P *n'est pas sur l'axe principal,* on peut mener un rayon incident PI parallèle à l'axe principal CM, le prolongement du rayon réfléchi correspondant passe par le foyer principal F ; la droite FI coupe l'axe secondaire au point cherché P′ (fig. 502).

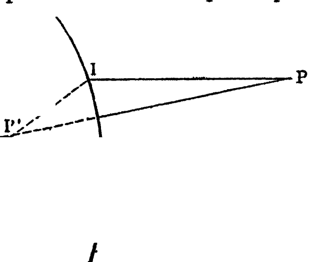


Fig. 502.

461. Image d'un objet. — L'image d'un objet est formée par les images de ses points. Une petite droite PN, perpendiculaire à l'axe principal, a pour image une petite droite P′N′, perpendiculaire à l'axe.

Droite perpendiculaire à l'axe principal. Positions et

grandeurs de l'image. — On construit le conjugué P′ d'un point P, puis on abaisse de P′ une perpendiculaire P′N′ sur l'axe principal (fig. 503).

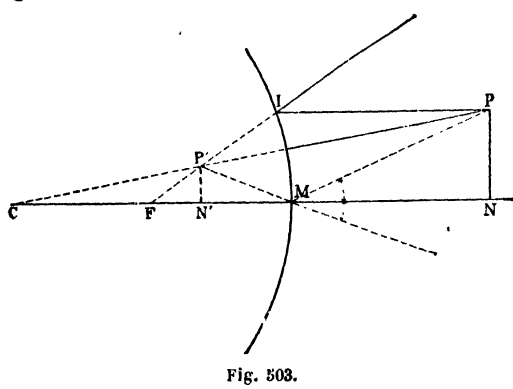


Fig. 503.

Les triangles rectangles semblables IMF, P′N′F de sommet F donnent une expression du rapport

$$\frac{P'N'}{IM} \text{ ou } \frac{P'N'}{PN} = \frac{p'}{p}.$$

Les triangles rectangles semblables PMN, P′MN′ de sommet M, obtenus en menant un rayon PM et le rayon réfléchi correspondant donnent une seconde expression de $\frac{P'N'}{PN}$. On égale les deux valeurs du rapport.

I. **Droite réelle placée du côté de la surface réfléchissante.** — L'image est *virtuelle*, *droite* et plus petite que l'objet (fig. 504).

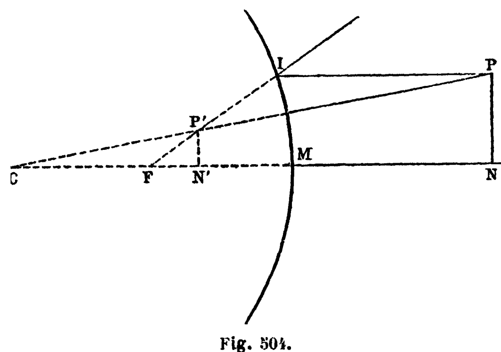


Fig. 504.

$$\frac{P'N'}{PN} = \frac{FN'}{FM} = \frac{f - p'}{f}$$

$$\frac{p'}{p} = \frac{f - p'}{f}$$

d'où $p'f - pf = -pp'$

et $\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = -\frac{1}{f}$

II. **Droite virtuelle entre le miroir et le foyer principal.** — PN serait une image réelle formée par des rayons convergents; l'interposition du miroir M empêche sa production; les rayons incidents ont la même direction que si l'image PN se formait; on effectue les constructions comme si elle existait.

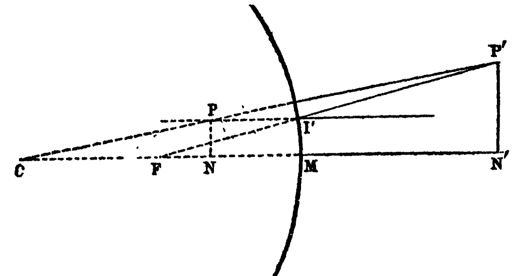


Fig. 505.

L'image est *réelle, droite,* plus grande que l'objet (fig. 505).

$$\frac{P'N'}{PN}=\frac{FN'}{FM}=\frac{p'+f}{f}.$$

$$\frac{p'}{p}=\frac{p'+f}{f} \quad \text{d'où } pf-p'f=-pp' \quad \text{et} \quad \frac{1}{p'}-\frac{1}{p}=-\frac{1}{f}.$$

III. **Droite virtuelle au delà du foyer principal.** — L'image est *virtuelle* et *renversée* (fig. 506)

$$\frac{P'N'}{PN}=\frac{F'N'}{FM}=\frac{p'-f}{f}.$$

$$\frac{p'}{p}=\frac{p'-f}{f},$$

d'où $-pf-p'f=-pp'$

et $-\frac{1}{p'}-\frac{1}{p}=-\frac{1}{f}.$

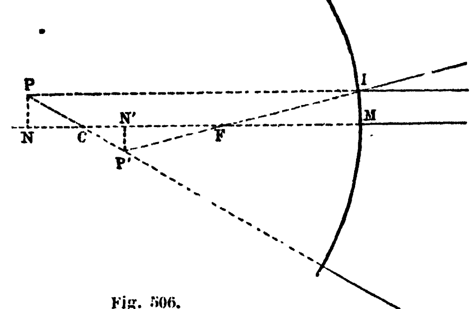


Fig. 506.

462. Remarques générales. — L'image et l'objet sont toujours, à la fois, *du même côté du foyer principal.*

N et N' étant conjugués, les relations trouvées entre MN et M'N' se rapportent aux distances au miroir de deux points conjugués situés soit sur l'axe principal, soit sur un axe secondaire.

Les trois équations trouvées :

$$\frac{1}{p}-\frac{1}{p'}=-\frac{1}{f}, \qquad \frac{1}{p'}-\frac{1}{p}=-\frac{1}{f} \qquad -\frac{1}{p'}-\frac{1}{p}=-\frac{1}{f}$$

se déduisent d'une seule $\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=-\frac{1}{f}$, en faisant précéder p et p' du signe $+$ ou du signe $-$ suivant qu'il s'agit d'un point de concours réel ou virtuel.

Formule générale. — La construction étant faite, la règle précédente donne la solution arithmétique pour chaque cas. Si l'on convient de compter les segments p et p' positivement du côté d'où vient la lumière et négativement en arrière du miroir, la résolution par rapport à p' de l'équation unique $\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=-\frac{1}{f}$ fait connaître, *sans construction*, les positions relatives du point lumineux et de son image quand le point lumineux parcourt un axe. Avec une valeur négative trouvée pour p', l'image est virtuelle et semble se former derrière le miroir; une valeur positive indique une image réelle qui se forme devant le miroir.

L'image est *renversée* pour $\frac{p'}{p}$ positif, et *droite* pour $\frac{p'}{p}$ négatif.

Le point lumineux et son image marchent constamment en sens inverse; ils se rencontrent deux fois, au sommet du miroir et au centre.

En comptant, à partir du foyer principal les distances du point lumineux et de son image, on trouve la relation $\varpi\varpi' = f^2$.

463. Mesure de la distance focale principale d'un miroir convexe. — Le miroir est recouvert d'une feuille de papier dans laquelle on a ménagé en N et N_1 deux petites ouvertures, dans un plan passant par l'axe et à égale distance de l'axe (fig. 507). On fait tomber sur la surface réfléchissante un faisceau parallèle à l'axe. Les rayons réfléchis en N et N_1 rencontrent en N′ et N'_1 un écran percé d'une ouverture qui a laissé passer les rayons incidents. On place l'écran à une distance telle que $N'N'_1 = 2NN_1$.

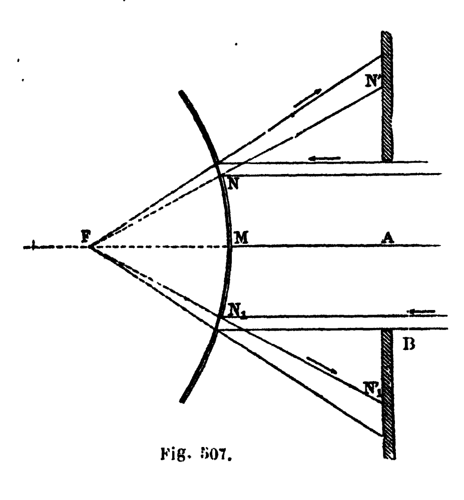


Fig. 507.

Dans les triangles semblables NN_1F, $N'N'_1F$,

$$\frac{N'N'_1}{NN_1} = \frac{AF}{FM} \quad \text{d'où} \quad AF = 2FM \quad \text{et} \quad FM = MA.$$

La distance de l'écran au miroir est la distance focale principale.

Dans le cas d'un miroir convexe M de petites dimensions, on fait coïncider son axe principal avec celui d'un miroir concave M′ de distance focale M′F′ sur lequel on reçoit un faisceau solaire parallèle à l'axe (fig. 508). On fait en sorte qu'une image réelle P provenant des rayons de l'image virtuelle F′ se forme entre M et M′.

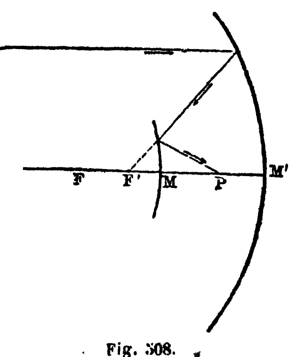


Fig. 508.

On mesure $MP = p'$ et $MM' = d$.
On a $MF' = F' - d$.

L'équation du miroir convexe (où le point de concours F′ est virtuel et P réel) est ici : $\frac{1}{p'} - \frac{1}{F' - d} = -\frac{1}{f}$. $f = MF$ est la distance focale cherchée.

464. Aberration de sphéricité. — Si l'ouverture d'un miroir sphérique n'est pas très petite, les rayons émanés d'un point P et réfléchis près des bords, ou *rayons marginaux*, *ne convergent pas au même point* que les rayons réfléchis près du sommet, ou *rayons centraux*. Ce défaut de convergence a reçu le nom d'*aberration de sphéricité*. Le foyer principal

F des rayons centraux est à la distance $\frac{R}{2}$ du sommet. Le foyer F′ des rayons marginaux est plus voisin du sommet que le foyer F.

Soit un miroir concave, d'une demi-ouverture égale à ω, sur lequel on reçoit des rayons marginaux parallèles à l'axe principal (fig. 509).

Le triangle CF′I est isocèle, la perpendiculaire F′H rencontre IC en son milieu H.

$$CF' = \frac{CH}{\cos \omega} = \frac{R}{2 \cos \omega}; \text{ donc } CF' > \frac{R}{2}.$$

$FF' = \frac{R}{2}\left(\frac{1}{\cos \omega} - 1\right)$ s'appelle *aberration longitudinale principale.* Elle est négligeable quand l'ouverture ne dépasse pas quelques degrés.

La propriété de concentrer en un point un faisceau de rayons incidents

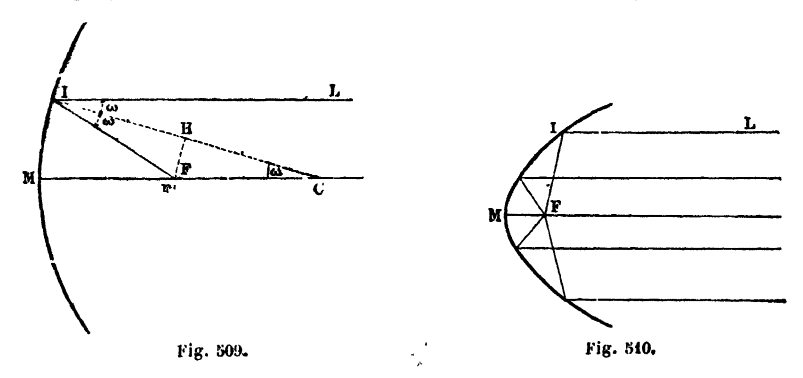


Fig. 509. Fig. 510.

parallèles, approximative pour un miroir sphérique de petite ouverture (1), devient rigoureuse pour un **miroir parabolique** (fig. 510) qui reçoit des rayons parallèles à son axe. Inversement un miroir parabolique réfléchit parallèlement à son axe des rayons lumineux qui émanent de son foyer (2) (réflecteurs de phares, télescopes).

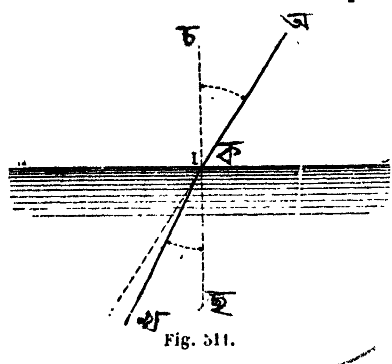
RÉFRACTION

465. Déviation brusque d'un rayon lumineux. — Sous une incidence oblique, un rayon lumineux se brise à la surface de séparation de deux milieux transparents. Les deux trajets, *séparément rectilignes* dans chacun des milieux, ne sont pas en prolonge-

(1) Un *miroir* est dit *aplanétique* quand il jouit de la propriété géométrique de donner une image d'un point réduite à un point. Un miroir aplanétique est donc dépourvu d'aberration. Un miroir plan est aplanétique, quelle que soit la position du point lumineux. Un miroir sphérique n'est aplanétique que pour un point situé en son centre.

(2) Un *miroir parabolique* est une surface engendrée par la rotation d'une parabole autour de son axe (droite qui joint le foyer de la parabole à son sommet). Dans une parabole, un rayon incident FI et la parallèle à l'axe IL font, avec la normale en I, des angles égaux; IL est donc le rayon réfléchi.

ment. Le changement *brusque* de direction qu'éprouve un rayon lumineux à la surface de séparation de deux milieux se nomme **réfraction**. Le second milieu est *plus réfringent* que le premier si le rayon se rapproche de la normale en y pénétrant; il est moins réfringent s'il s'en écarte.


Fig. 511.

On appelle *plan d'incidence* le plan mené par le rayon incident et la normale à son point d'incidence, *plan de réfraction* le plan du rayon réfracté et de la normale, *angle d'incidence* l'angle NIS de la normale et du rayon incident, *angle de réfraction* l'angle N'IR de la normale et du rayon réfracté (fig. 511).

Lois de la réfraction. — La réfraction de la lumière a lieu conformément à deux lois, dites *lois de Descartes :*

1° *Le rayon réfracté reste dans le plan d'incidence;* par suite, le rayon incident, la normale au point d'incidence et le rayon réfracté sont dans un même plan normal à la surface de séparation.

2° *Quel que soit l'angle d'incidence, pour deux mêmes milieux, le sinus de l'angle d'incidence et le sinus de l'angle de réfraction sont dans un rapport constant.*

$$\frac{\text{Sin } i}{\text{Sin } r} = m \qquad \text{ou } \sin i = m \sin r;$$

le rapport constant m se nomme **indice de réfraction** du second milieu (où l'angle est r) par rapport au premier.

$m > 1$ si le second milieu est plus réfringent; $m < 1$ si le second milieu est moins réfringent que le premier. L'indice de réfraction est une constante physique qui peut servir à caractériser un corps (1).

Lorsque l'angle d'incidence est très petit, il en est de même de l'angle de réfraction, d'après l'équation $\sin i = m \sin r$; les sinus peuvent être alors confondus avec les arcs et la deuxième loi prend la forme $i = mr$.

Vérification. — On peut employer un appareil analogue à celui qui a servi pour les lois de la réflexion (fig. 512).

Le miroir plan est remplacé par une cuve hémicylindrique R, en verre, dont l'axe est perpendiculaire au plan du cercle vertical divisé et passe par son centre. Dans la cuve, on verse de l'eau jusqu'à la

(1) Un corps transparent immergé dans un liquide transparent de même couleur et de même indice ne s'en distingue pas.

hauteur *exacte* du centre O du cercle. A l'aide d'un miroir M, on dirige un rayon solaire de manière qu'en suivant l'axe du tube A il frappe le liquide en O. Ce rayon AO se réfracte, et sort dans une direction OK. Le rayon réfracté, normal à la paroi de la cuve cylindrique, ne se réfracte pas à la sortie.

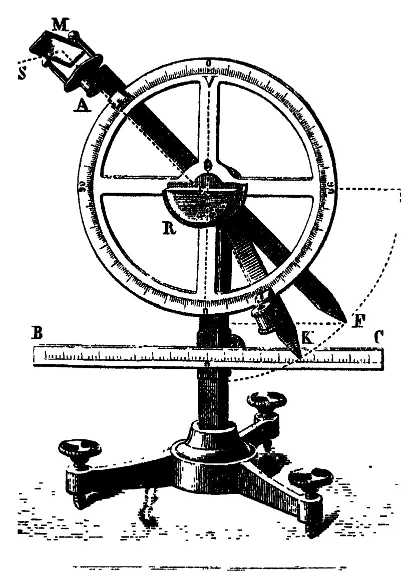


Fig. 512.

Première loi. — On fait tourner la deuxième alidade jusqu'à ce que le rayon émergent suive l'axe du tube qu'elle porte. Les axes des deux tubes étant à la même distance du cercle divisé, le plan de ces axes est *parallèle au plan du cercle, vertical comme lui,* et perpendiculaire à la surface de l'eau qui est horizontale. Ce plan vertical passe par le point d'incidence, *il contient le rayon incident et le rayon réfracté* qui ont suivi les axes des deux tubes *et aussi la normale* au point d'incidence. La première loi est donc vérifiée.

Deuxième loi. — Si l'on donne à l'angle d'incidence dans l'air des valeurs i, i' i''.., l'angle de réfraction prend des valeurs r, r', r''... Les alidades mesurent les angles i et r. On calcule les sinus.

Les sinus sont d'ailleurs donnés directement par une règle divisée horizontale BC qui peut glisser le long du diamètre vertical du cercle : on amène cette règle à toucher *successivement* la pointe F de l'alidade parallèle au rayon incident et la pointe K de l'alidade parallèle au rayon réfracté. Les rayons OF et OK étant égaux, les perpendiculaires abaissées de F et K sur le diamètre vertical du cercle, sont proportionnelles aux sinus des angles d'incidence et de réfraction ; leurs longueurs sont lues sur la règle.

On vérifie que le quotient $\frac{\sin i}{\sin r}$ est constant. Ce quotient est l'*indice de réfraction de l'eau par rapport à l'air* (1).

(1) Avec un [illegible]cylindre de verre substitué à la cuve, le quotient $\frac{\sin i}{\sin r'}$ est l'indice du verre par rapport à l'air (angle r' dans le verre).

Réversibilité. — Les deux alidades étant fixées en OA et en OK dans les positions du passage de l'air dans l'eau pour une incidence déterminée (fig. 512), si un rayon lumineux arrive par la partie inférieure parallèlement à la deuxième alidade, KO devient la direction du rayon incident, OA est la direction du rayon réfracté. C'est la loi de réversibilité ou de *retour inverse des rayons*. Au passage de l'eau dans l'air, le rayon réfracté s'éloigne de la normale.

Indices inverses. — i désignant un angle d'incidence dans un milieu M et r l'angle du rayon réfracté dans le milieu M', $\frac{\sin i}{\sin r} = m$ est l'indice du milieu M' par rapport au milieu M.

En marche inverse, r étant l'angle d'incidence dans le milieu M', i est l'angle de réfraction dans le milieu M, $\frac{\sin r}{\sin i} = \frac{1}{m}$ est l'indice de M par rapport a M'. L'indice de l'eau par rapport à l'air est $\frac{4}{3}$; l'indice de l'air par rapport à l'eau est $\frac{3}{4}$.

m_2^1 étant l'indice d'un milieu 2 par rapport a un milieu 1 et m_1^2 l'indice du milieu 1 par rapport au milieu 2, on a : $m_2^1 m_1^2 = 1$.

Les lois de la réfraction conduisent, pour les prismes et les lentilles, à des conséquences qui confirment leur exactitude.

466. Déplacement apparent des objets par réfraction. — Au fond d'un vase vide à parois opaques on met une pièce de monnaie et on abaisse l'œil en A jusqu'à ce qu'un rayon visuel BA,

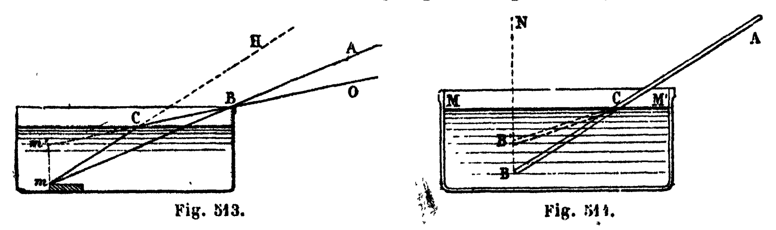


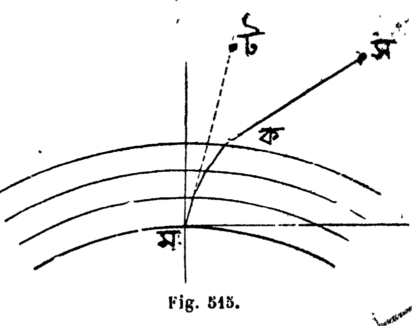
Fig. 513. Fig. 514.

rasant le contour du vase, atteigne le bord m de la pièce de monnaie (fig. 513). En descendant un peu l'œil vers O, la pièce devient invisible. Si un aide verse de l'eau dans le vase, la pièce devient visible pour l'œil en O, et le bord m est vu suivant OC; le rayon mC, qui continuait sa route suivant CH lorsque le vase était vide, se réfracte en C suivant CO quand le vase est plein d'eau. L'œil rapporte m à un point de concours m' et voit la pièce relevée vers la surface (1).

(1) Le nouveau point de concours m' est *à peu près* sur la verticale du point m, le rayon vertical issu de m sortant sans déviation.

Un bâton plongé obliquement dans l'eau paraît brisé au point d'immersion (fig. 514), et chacun de ses points semble relevé vers la surface de l'eau comme dans l'expérience précédente.

467. Réfraction atmosphérique. — La réfraction de la lumière nous fait voir les astres dans une direction plus voisine du zénith que celle qu'ils occupent réellement. Les couches gazeuses concentriques de l'atmosphère augmentent de densité en s'approchant du sol. La réfraction croissant dans un gaz avec la densité, un rayon SA éprouve, en traversant les couches successives, une série de déviations qui le rapprochent graduellement de la normale (fig. 515). Sa trajectoire est courbe; un astre est vu dans le prolongement IS′ de la direction du dernier rayon réfracté. Le soleil et la lune paraissent ainsi au-dessus de l'horizon avant leur lever et après leur coucher.


Fig. 515.

468. Passage de la lumière dans un milieu plus réfringent. — Quand la lumière passe *de l'air dans l'eau,* un rayon incident normal à la surface de séparation la traverse sans déviation. L'angle de réfraction croît avec l'angle d'incidence mais moins vite et n'atteint pas 90° (1). Sous une incidence rasante, l'angle de réfraction a sa plus grande valeur L donnée par

$$\sin 90^0 = m \sin \mathrm{L}, \quad \text{d'où} \quad \sin \mathrm{L} = \frac{1}{m}.$$

L'angle de réfraction L, qui correspond à une incidence de 90°, s'appelle **angle limite**. Tous les rayons venant de l'air qui tombent en un point I de la surface, se réfractent à l'intérieur d'un cône d'angle L (fig. 516). Si la surface liquide était couverte, en ce point, d'un écran opaque percé d'un trou, il ne pénétrerait pas dans l'eau de lumière à l'extérieur du cône de sommet I et d'angle L. La valeur de L pour l'eau est environ 48°30′.

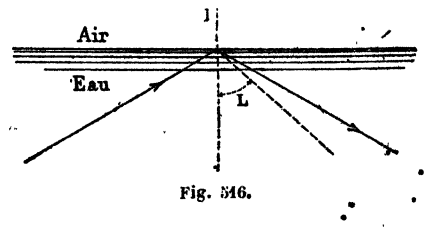


Fig. 516.

(1) La *déviation* D du rayon incident, égale à $i - r$, augmente avec l'incidence.

469. Passage de la lumière dans un milieu moins réfringent. — Dans le passage *de l'eau dans l'air*, désignons par r l'angle d'incidence dans l'eau et par i l'angle de réfraction dans l'air. D'après la reversibilité des rayons (**465**), les valeurs correspondantes de i et de r sont les mêmes que dans le passage inverse, de l'air dans l'eau et on a encore $\sin i = m \sin r$.

Lorsque $r = 0$, on a $i = 0$; r et i augmentent ensuite en même temps, mais i croît plus vite que r. Lorsque $r = L$, on a $i = 90^0$, d'après l'équation $\sin i = m \sin L$, puisque $m \sin L = 1$.

Un rayon, qui vient de l'eau, et tombe sous l'angle L sort donc dans l'air en rasant la surface de séparation.

$r > L$, donnerait $m \sin r$ ou $\sin i$ supérieur à l'unité. La réfraction n'est donc possible, pour un rayon venant de l'eau dans l'air, que si l'angle d'incidence est inférieur à L.

Réflexion totale. — Si, sur la surface de séparation de deux milieux, un rayon tombe sous un angle supérieur à l'angle limite L, en venant du milieu le plus réfringent, il y a *réflexion*, suivant les lois géométriques de la réflexion sur un miroir plan et cette réflexion est *totale*.

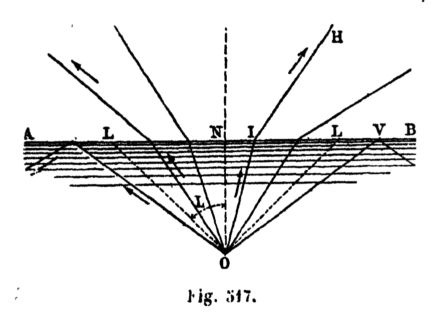


Fig. 517.

Soit un point lumineux O situé dans l'eau (fig. 517), construisons un cône circulaire droit ayant pour axe la normale ON à la surface de séparation et pour angle au sommet l'angle limite L; un rayon compris dans ce cône sortira dans l'air, car il tombera en I sous un angle inférieur à L; un rayon OL dirigé suivant une génératrice du cône aura un angle d'incidence égal à L et sortira en rasant la surface de séparation. Tout rayon OV extérieur au cône, tombant sous une incidence supérieure à L, sera réfléchi totalement. La surface du cône sépare les rayons issus de O qui émergent dans l'air de ceux qui subissent la réflexion totale.

La lumière qui émane de O est en partie réfléchie et en partie réfractée. Pour une incidence inférieure à l'angle limite mais voisine de cette valeur, la portion réfléchie est notable et la portion réfractée dans l'air est très faible. Pour des incidences égales ou supérieures à l'angle limite, la réflexion est totale.

470. Prisme à réflexion totale. — Soit un prisme dont la section

droite est un triangle rectangle isocèle; un rayon lumineux incident, normal à l'une des faces AB (fig. 518), entre sans déviation. Il rencontre la face hypoténuse sous un angle de 45°. Cette incidence est supérieure à l'angle limite qui est environ 41° (pour un verre d'indice égal à 1,50); il y a réflexion totale en I, *comme sur un miroir métallique* et le rayon sort ensuite normalement à la face AC.

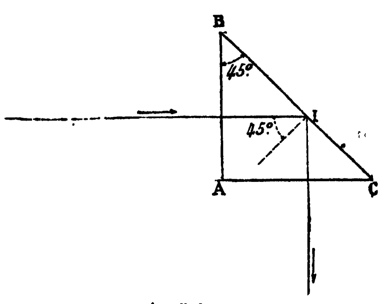


Fig. 518.

Un prisme à réflexion totale est utilisé dans la *chambre claire*. Le *périscope* des sous-marins est un prisme à réflexion totale maintenu hors de l'eau par un tube dont les rayons réfléchis suivent l'axe; les objets extérieurs forment leur image sur un papier normal au tube.

Un prisme à réflexion totale peut servir à *redresser* l'image d'un objet. Les rayons incidents sont alors parallèles à la face hypoténuse du prisme.

Chambre claire. — Une chambre claire sert à substituer à un objet une image *virtuelle* que l'on peut *dessiner* en suivant sur le papier ses contours avec un crayon. Un miroir à 45° donne d'un objet vertical une image horizontale, mais cette réflexion unique donne une image symétrique qui n'est pas superposable à l'objet.

On préfère recourir à deux réflexions successives sur un prisme quadrangulaire à réflexion totale ABCD (fig. 519). Les deux faces AB et AD sont perpendiculaires l'une sur l'autre, l'angle BCD est de 135°, les angles en B et D sont égaux à 67°30 (1). Un objet vertical MN disposé devant la face AB du prisme donne par réflexion sur la face BC une image M'N' et celle-ci, sur la face CD, une seconde image M"N" horizontale et *superposable à l'objet*.

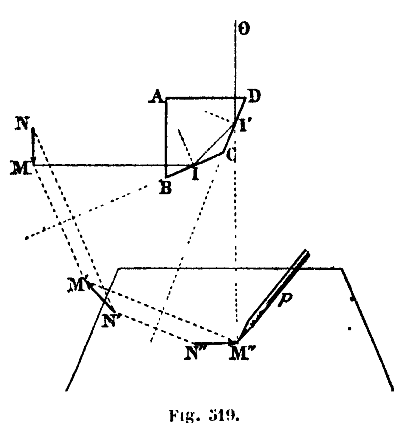


Fig. 519.

En plaçant l'œil au-dessus de l'arête D du prisme, on peut recevoir, en

(1) 360° — 135° — 90° = 2 (67° 30'). Les angles d'incidence en I et I' sont égaux et leurs côtés étant perpendiculaires aux côtés des angles B et D, ils sont égaux comme B et D à 67°30', qui est un angle notablement supérieur à l'angle limite sur le verre.

même temps, des rayons directs de la pointe du crayon et des rayons deux fois réfléchis de l'objet à dessiner.

471. Mirage. — Le phénomène du mirage est dû à une réflexion totale qui se produit sur des couches d'air voisines du sol qui sont échauffées par le soleil. Des objets vus directement à une certaine distance présentent, en même temps, par réflexion totale, leur image renversée et symétrique.

Explication. — Dans un air *calme,* des couches gazeuses échauffées par un sol brûlant, peuvent prendre, jusqu'à une certaine hauteur, une densité et une réfringence inférieures à celles des couches supérieures et *décroissant de haut en bas.* Un observateur placé en O voit un point A directement. D'autre part, des rayons issus de A tombent obliquement sur des couches qui sont moins réfringentes de haut en bas, et s'écartent progressivement des normales aux points d'incidence. Sur une couche suffisamment rapprochée du sol, l'incidence est assez oblique pour qu'il y ait réflexion totale en I (fig. 520), de là, pour un rayon parti de A, une trajectoire curviligne, tournant sa concavité vers le ciel. Le rayon réfléchi totalement se redresse suivant une trajectoire à peu près symétrique de la première par rapport à la verticale du point I et arrive à l'observateur. Celui-ci voit ainsi à la fois le point A et son image symétrique A′. La vue de cette image fait croire à une surface liquide réfléchissante.

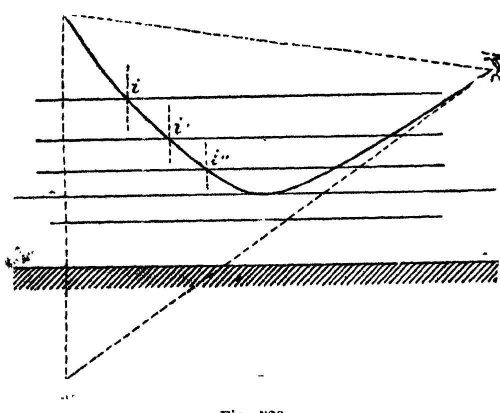


Fig. 520.

Le mirage est souvent observé dans les plaines de l'Égypte, dans la Crau, aux Bouches-du-Rhône, sur des plages sablonneuses, sur la mer quand un air calme s'est échauffé au contact de l'eau.

472. Réfraction à travers une lame à faces parallèles. — Un rayon lumineux qui tombe normalement sur une lame transparente *à faces parallèles,* placée dans l'air, la traverse sans déviation et sans déplacement.

Quand l'incidence est oblique, il y a **déplacement sans déviation.**

Soit i l'angle d'incidence sur la face A (fig. 521), r l'angle de réfraction. L'angle d'incidence sur la face B, parallèle à la face A, sera r, à cause de l'égalité des deux angles formés en I et en I′ par la sécante II′ et les normales IN, I′N′.

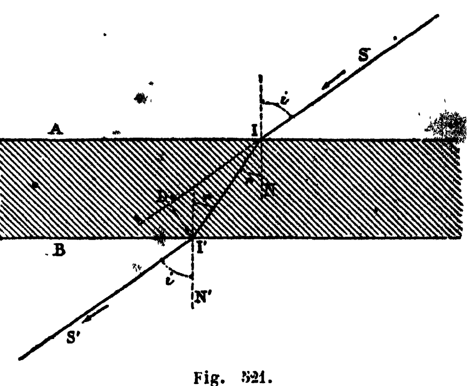


Fig. 521.

En I′, l'angle d'incidence dans la lame étant r, l'angle de réfraction dans l'air sera i, d'après la loi de la réversibilité ; le rayon émergent I′S′ est parallèle au rayon entrant IS.

Pour une épaisseur e, le déplacement est : $I'D = II' \sin(i - r)$

$$\text{or} \quad II' = \frac{e}{\cos r} \quad \text{donc} \quad I'D = \frac{e \sin(i - r)}{\cos r}.$$

Pour observer le déplacement, on dispose entre l'œil et une fente éclairée horizontale F, une lame de verre épaisse MM′ à faces parallèles (fig. 522). Quand la lame est normale aux rayons, les rayons qui la traversent ne sont pas déplacés et la bande lumineuse reste rectiligne. Si l'on incline la lame, en laissant l'extrémité M fixe et en portant l'extrémité M′ en avant du plan de la figure, la portion de la bande lumineuse CD qui est vue à travers la lame de verre est transportée parallèlement à elle-même au-dessous des parties latérales qui sont vues directement.

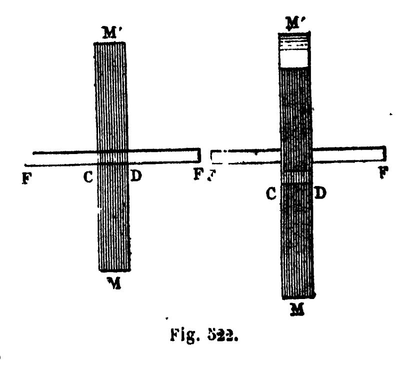


Fig. 522.

473. Réfraction à travers plusieurs lames. — Soit un système de plusieurs lames *à faces parallèles*, plongé dans l'air et recevant obliquement un rayon lumineux. Ce rayon sort parallèlement à sa direction d'entrée, il est déplacé, sans être dévié.

Considérons en particulier deux lames superposées (fig. 523). Les normales étant parallèles en I_1 et I_2, les deux angles i_2 du rayon avec les normales sont égaux dans le milieu 2 ; de même, les deux angles i_3 sont égaux entre eux dans le milieu 3.

Cela résulte de ce qui a été vu pour une seule lame, si les lames 2 et 3 sont séparées par de l'air. Quand les deux lames sont en contact, c'est un fait d'observation que le rayon émergent I_3S est encore parallèle au rayon incident SI_1.

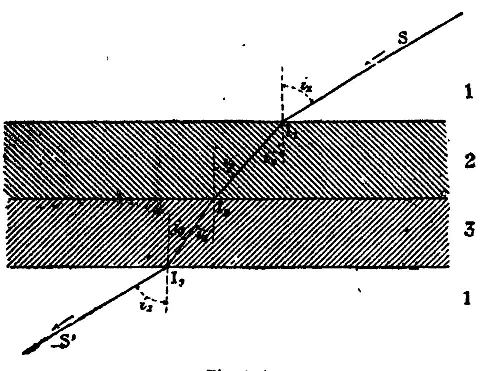


Fig. 523.

On a : $\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = m_2^1$,

$\frac{\sin i_2}{\sin i_3} = m_3^2$,

$\frac{\sin i_3}{\sin i_1} = m_1^3$

Multiplions ces trois équations membre à membre :

$$1 = m_2^1 \; m_3^2 \; m_1^3 \quad \text{ou} \quad m_3^2 = \frac{1}{m_2^1 \; m_1^3}$$

$$\text{et comme} \quad \frac{1}{m_1^3} = m_3^1, \quad \text{on a} \quad m_3^2 = \frac{m_3^1}{m_2^1} \text{ (1)}.$$

L'indice de réfraction d'un milieu 3 par rapport à un milieu 2 s'obtient donc, *sans mesure directe*, par le quotient des indices des milieux 3 et 2 par rapport à un même milieu 1 quelconque.

Indices absolus. — On appelle *indices absolus* les indices de réfraction par rapport au vide.

m_2^1 étant l'indice d'un milieu 2 par rapport à l'air (milieu 1), m_2 et m_1 les indices du milieu 2 et de l'air par rapport au vide,

$$m_2^1 = \frac{m_2}{m_1} \quad \text{d'où} \quad m_2 = m_2^1 \; m_1 ;$$

l'indice absolu d'une substance est le produit de son indice par rapport à l'air par l'indice absolu de l'air. L'indice absolu de l'air étant très voisin de l'unité (égal à 1,000294 à 0°, sous la pression 76), un indice absolu diffère très peu de l'indice par rapport à l'air.

Énoncé général de la loi des sinus. — Dans la première des lames parallèles (**473**) on a $\sin i_1 = m_2^1 \sin i_2$; et dans la dernière $\sin i_1 = m_3^1 \sin i_3$;

On en déduit $m_2^1 \sin i_2 = m_3^1 \sin i_3$.

(1) Si l'on écrivait $m_{\frac{2}{3}}$, $m_{\frac{1}{3}}$, $m_{\frac{1}{2}}$, de même que $\frac{2}{3} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{3}$, on aurait $m_{\frac{2}{3}} \cdot m_{\frac{1}{2}} = m_{\frac{1}{3}}$.

Si le milieu extérieur est le vide on a encore

$$m_2 \sin i_2 = m_3 \sin i_3.$$

La *loi générale de la réfraction* est exprimée par la constance du produit $m \sin r = m' \sin r'$, au passage d'un rayon lumineux d'un milieu dans un autre; m est l'indice de l'un des milieux par rapport au vide et r l'angle du rayon avec la normale dans ce milieu.

474. Images par réfraction. — Les rayons issus d'un point S ne donnent une image en se réfractant à travers une surface plane, que pour un faisceau de *petite incidence*.

1° ***Cas d'une seule surface plane réfringente.*** — Un rayon lumineux, issu d'un point S et tombant, sur une surface plane, sous une incidence i, coupe après réfraction la perpendiculaire SB en un point S′ (fig. 524).

$$\text{Soit } SB = p \quad \text{et } S'B = p',$$

si l'incidence i *est petite*, l'angle de réfraction r est également petit.

Dans les triangles rectangles, SIB, S′IB, on a $IB = p\,tg\,i = p'\,tg\,r$;

$$p' = p\,\frac{tg\,i}{tg\,r} \quad \text{ou } p' = p\,\frac{i}{r} = pm,$$

à cause de la petitesse des angles i et r. La distance p' est alors indépendante de l'incidence, elle est *sensiblement* la même pour tous les rayons de petite incidence. $S'S = p' - p = p\,(m - 1)$

Si les rayons d'un point lumineux S viennent d'un milieu plus réfringent et passent dans l'air, l'indice m du milieu plus réfringent par rapport à l'air doit être remplacé par $\frac{1}{m}$;

$$\text{On a } p' = \frac{p}{m}, \quad \text{d'où } p - p' = p - \frac{p}{m} = p\,\frac{m - 1}{m}$$

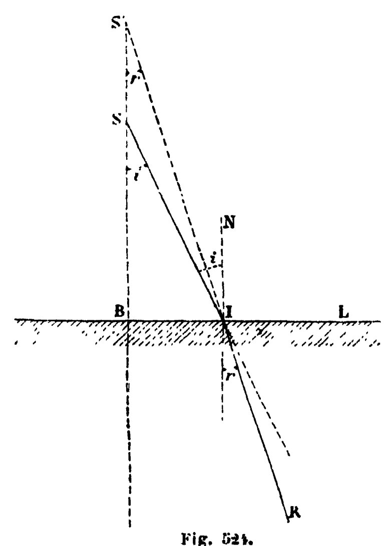


Fig. 524.

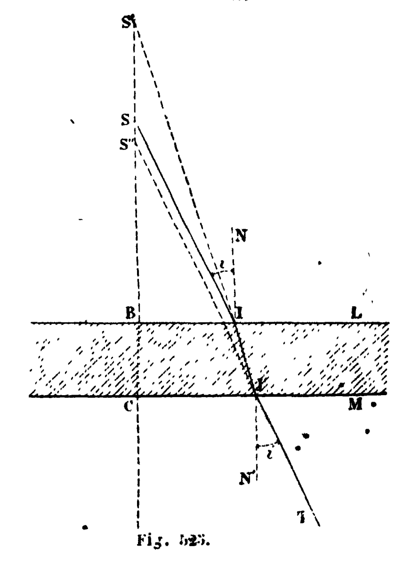


Fig. 525.

2° *Cas d'une lame réfringente à faces parallèles.* — Soit une lame d'épaisseur e. Les rayons *de petite incidence*, issus de S, sont, après réfraction à travers la surface BL, dans les mêmes conditions que s'ils venaient d'un point S′ dont la distance S′B est $p' = pm$ (fig. 525).

Dans la réfraction à travers la surface CM, une image S″ se déduit de l'image S′ en comptant les distances à partir de cette surface et en remplaçant m par $\frac{1}{m}$, puisqu'il y a retour dans l'air.

$$\text{Or,} \quad S'C = p' + e = pm + e; \quad S''C = p'' = S'C\,\frac{1}{m}$$

$$\text{Donc} \quad p'' = (pm + e)\frac{1}{m} = p + \frac{e}{m}$$

$$\text{On a ainsi :} \quad p'' - p = \frac{e}{m}, \quad S''B = p'' - e. \quad \text{De là,}$$

$$SS'' = SB - S''B = p - S''B = p - p'' + e = e - \frac{e}{m} = e\,\frac{m-1}{m}$$

Le rapprochement apparent SS″ du point lumineux, indépendant de p, ne dépend que de l'épaisseur de la lame et de l'indice (1).

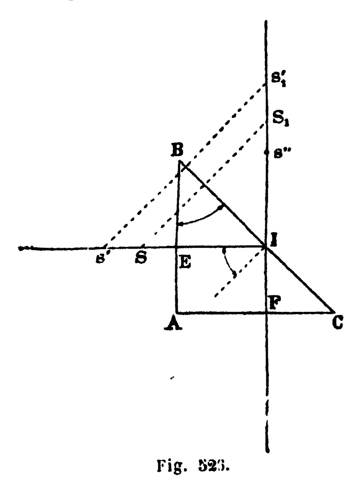


Fig. 525.

Lorsque, entre l'objet et l'œil, on interpose une lame transparente à faces parallèles, normalement aux rayons visuels, l'objet est vu sans déformation; il paraît un peu rapproché de la lame.

3° *Images par un prisme à réflexion totale* (fig. 526). — Un rayon SE, normal à la face d'entrée AB n'est pas dévié, il rencontre la face hypoténuse sous un angle de 45°; après réflexion totale, il sort suivant IF normalement à la face AC. Le trajet intérieur est $EI + IF = e$. Comme l'angle limite pour le verre est de 41° environ, il y a encore réflexion totale pour les rayons voisins qui forment avec SE un faisceau de petite incidence, de sommet S.

Dans ces conditions, un prisme à réflexion totale donne une image d'un point S comme le ferait un miroir

(1) Si l'on considère un point S d'un trait, appliqué contre la face inférieure d'une lame à faces parallèles d'épaisseur e, l'indice de réfraction de la lame peut être obtenu en *visant successivement avec un microscope* le point S : d'abord directement, puis à travers la lame. La mesure de *l'écart* SS″ *de la mise au point* dans les deux cas permet de calculer l'indice par la relation $SS'' = e\,\frac{m-1}{m}$, d'où $m = \frac{e}{e - SS''}$.

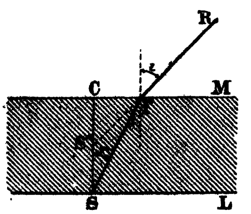


Fig. 526 *bis*.

On obtient ici rapidement SS″, à cause de la *petitesse* de l'angle i. $\operatorname{tg} i = \frac{CI'}{S''C}$ $\operatorname{tg} r = \frac{CI'}{SC}$

$$m = \frac{i}{r} = \frac{\operatorname{tg} i}{\operatorname{tg} r} = \frac{SC}{S''C} = \frac{e}{e - SS''}.$$

plan, avec cette différence que l'image est rapprochée comme elle le serait, par réfraction normale, à travers une lame de verre d'épaisseur e; on a $S_1S'' = e\,\frac{m-1}{m}$.

PRISME

475. En optique, on appelle *prisme* un milieu transparent limité par deux faces planes non parallèles. L'intersection AD des deux faces planes est l'*arête réfringente* du prisme; l'angle des deux faces est l'**angle réfringent**. La troisième face, taillée parallèlement à l'arête réfringente AD est la *base* du prisme (fig. 527) [1]. On soutient un prisme par un support (fig. 529) qui permet de donner à l'arête réfringente une orientation quelconque. Nous étudierons la marche d'un faisceau *dans une section droite* ABC, *déterminée par un plan perpendiculaire* à l'arête réfringente (fig. 528). Nous supposerons que le rayon incident a une *couleur déterminée,* rouge par exemple.

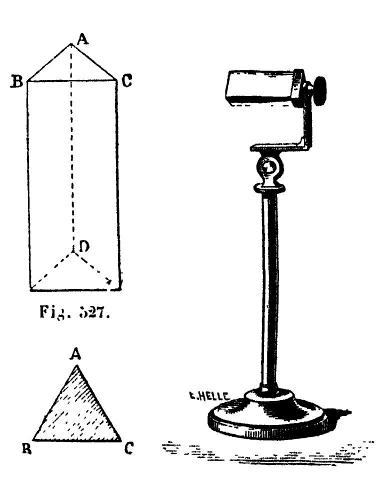


Fig. 527. Fig. 528. Fig. 529.

Marche des rayons dans un prisme. — Un rayon qui tombe sur un prisme dont la réfringence diffère de celle du milieu ambiant, est *dévié* et sort suivant une direction I'S' (fig. 530).

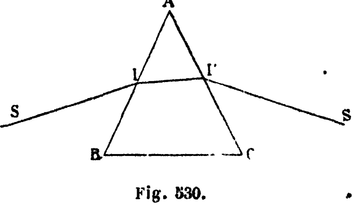


Fig. 530.

Construction du rayon dévié. — Si le rayon incident, SI, se trouve comme la normale IN dans *une section droite* (fig. 531), la section droite est le plan d'incidence. Le rayon réfracté en I reste dans le même plan. La normale I'N' en I' étant dans le même plan, ce plan est encore le plan d'incidence pour le rayon II', et le rayon ré-

(1) Deux plans perpendiculaires aux arêtes limitent le prisme.

fracté en I′ y reste également. Un rayon incident qui se trouve dans une section droite, s'y maintient donc à l'intérieur du prisme et à la sortie. Les deux réfractions, en I dans le milieu réfringent et en I′ dans l'air, concordent pour **abaisser le rayon vers la base** BC du prisme (1).

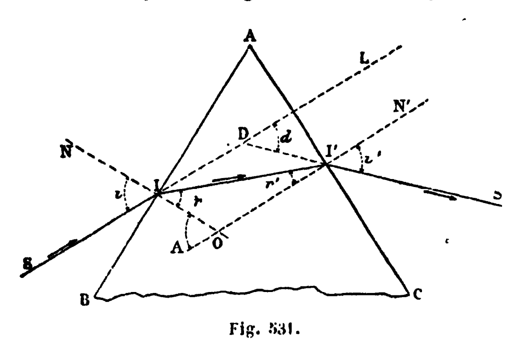


Fig. 531.

Les prolongements du rayon incident et du rayon émergent se rencontrent en D; l'angle des deux directions DL, DS′, prises dans le sens de la propagation des rayons, est la *déviation*, c'est l'angle LDS′ dont tourne le rayon en traversant le prisme.

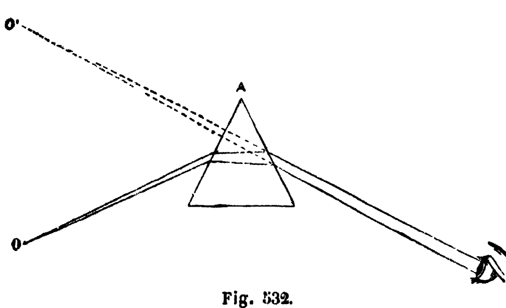


Fig. 532.

En regardant, à travers un prisme, un point O qui envoie un faisceau lumineux *très étroit* (fig. 532), on le voit en O′ sur la direction prolongée des rayons émergents, il est *relevé vers l'arête réfringente* du prisme. L'image est *virtuelle*, étant formée par les rayons réfractés prolongés en sens inverse de leur propagation.

Calcul de la déviation. — Soit i l'angle d'incidence en I sur la première face, r l'angle de réfraction en I, r' l'angle d'incidence en I′ sur la seconde face du prisme, i' l'angle d'émergence en I′; i et i' sont extérieurs, r et r' sont intérieurs (fig. 531).

L'angle de déviation d, extérieur au triangle IDI′, est égal à la somme DII′ + DI′I, c'est-à-dire à $(i - r) + (i' - r')$.

$$d = i + i' - (r + r')$$

L'angle en O, extérieur au triangle II′O, est égal à $r + r'$, et égal à l'angle A du prisme (angles aigus à côtés perpendiculaires).

$$\therefore A = r + r'; \text{ et } d = i + i' - A.$$

(1) Quand la substance du prisme est moins réfringente que le milieu ambiant, le rayon émergent est dévié vers le sommet du prisme.

Avec les relations $\sin i = m \sin r$, $\sin i' = m \sin r'$, on a quatre équations entre les sept variables i, i', r, r', m, d, A.

Lorsque l'indice m et l'angle réfringent A sont donnés, si l'on connaît i, l'équation $\sin i = m \sin r$ donne r ; $r + r' = A$ fournit r' ; enfin, $\sin i' = m \sin r'$ fait connaître i', et d est déterminé.

La déviation d dépend donc des variables i, m et A. Pour un prisme particulier, elle ne dépend que de i.

Lorsque *l'incidence est petite* et que *l'angle* A *du prisme est petit,* aux équations $d = i + i' - A$ et $A = r + r'$, on adjoint $i = mr$ (au lieu de $\sin i = m \sin r$ parce que i est petit) et $i' = mr'$ (r' est petit parce que A et r le sont).

Alors, $d = mr + mr' - A = m A - A = (m - 1) A$,
expression approchée, indépendante de l'incidence.

476. Étude expérimentale de la déviation. — 1° Pour une même incidence et des prismes de même angle, **la déviation augmente avec l'indice du prisme.** — On le démontre avec le *polyprisme,* formé de plusieurs prismes égaux, de substances à indices différents, accolés par leurs sections principales et ayant leurs

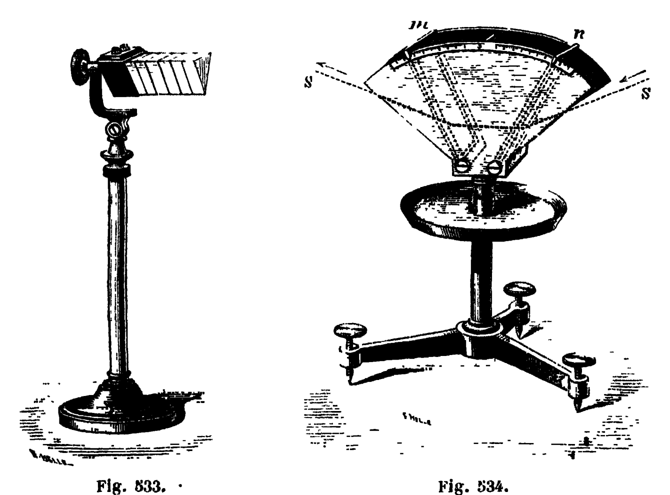


Fig. 533. Fig. 534.

arêtes en prolongement (fig. 533). On éclaire une face du polyprisme par une fente lumineuse rouge, *parallèle à l'arête réfringente;* chaque prisme produit une image déviée parallèle à l'arête; les images ne sont pas en ligne droite, leur déviation croît avec l'indice de réfraction.

2° *Pour une même incidence* et des prismes de même substance, **la déviation augmente avec l'angle réfringent.** — On le démontre avec un *prisme liquide à angle variable* (fig. 534).

C'est une cuve à fond plan dont deux faces m et n, en verre, sont mobiles autour de deux charnières horizontales ; ces deux lames glissent à frottement entre deux parois métalliques parallèles et fixes. Si les deux lames de verre sont parallèles, un rayon lumineux les traverse sans déviation. Laissant immobile la face d'entrée *n pour y maintenir l'angle d'incidence constant*, on incline la face de sortie *m* en l'écartant par le haut, ce qui forme un prisme dont l'arête est *horizontale et en bas.* Le rayon émergent se relève puisqu'il est dévié vers la base du prisme.

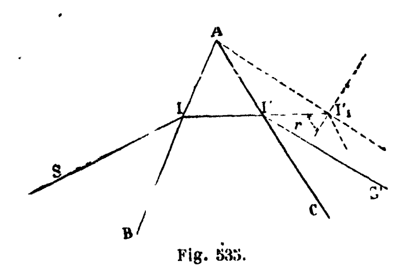


Fig. 535.

On ne peut pas accroître beaucoup la déviation en augmentant l'angle du prisme, car on fait croître en même temps l'angle r' sous lequel le rayon intérieur rencontre la deuxième face AC (d'après l'équation $A = r + r'$), et lorsque r' atteint l'angle limite, l'émergence n'a plus lieu en I'_1 : il y a alors *réflexion totale* (fig. 535).

Conditions d'émergence. — Un rayon lumineux se réfracte toujours à travers la première face AB, mais il n'émerge, par la deuxième face AC, que s'il la rencontre sous un angle r' inférieur à l'angle limite R.

Soit $m > 1$, appelons i_1 l'incidence sur la première face qui conduit à l'incidence limite $r' = R$ sur la deuxième face AI'_1 ; soit r_1 l'angle de réfraction correspondant à i_1 en I, on a : $\sin i_1 = m \sin r_1$,

$$r_1 + R = A, \quad \text{d'où} \quad r_1 = A - R ;$$

par conséquent, $\sin i_1 = m \sin (A - R)$.

Un rayon ne pourra émerger dans l'air par la deuxième face, que *si son incidence i sur la première face est supérieure à* i_1, car alors, l'angle de réfraction correspondant sera supérieur à $A - R$ et r' sera inférieur à R. Le prisme ne laissera donc sortir que les rayons incidents compris dans l'angle aigu SIB, qui est le complément de i_1.

L'angle SIB est d'autant plus petit que i_1 est plus grand, et, pour des valeurs constantes de m et R, que l'angle A du prisme est plus grand. L'angle SIB est égal à 90° pour $A = R$, car alors $i_1 = 0$; il est nul pour $A = 2R$, car alors $i_1 = 90°$. Pour $A > 2R$, aucun des rayons incidents ne sort, le prisme est *à réflexion totale.*

3° Pour un même prisme, **la déviation varie avec l'angle d'incidence.** — Supposons l'arête du prisme horizontale et prenons pour plan de la figure une section droite (fig. 536). Faisons tomber, dans ce plan, un faisceau lumineux SA sur le prisme et coupons le faisceau en deux par l'arête du prisme ; une partie tombe directement en C

sur un écran perpendiculaire au plan de la figure; l'autre partie réfractée et déviée rencontre l'écran en C'_1. L'angle CAC'_1 est la déviation. Sur l'écran, la distance CC'_1 croît ou décroît avec l'angle de déviation.

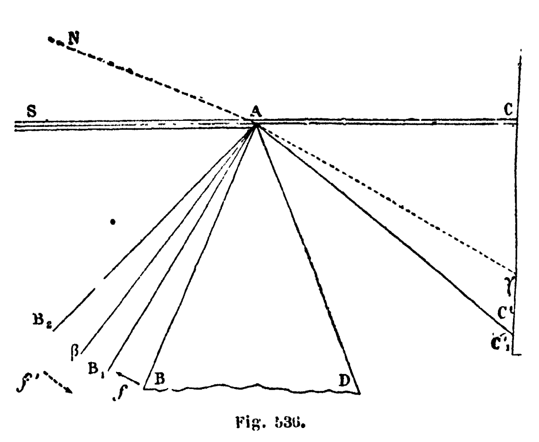


Fig. 536.

Minimum de déviation. — Faisons tourner lentement le prisme autour de son arête A, de manière à amener la face d'entrée AB en AB_1, puis en AB_2, ce qui augmente graduellement l'incidence SAN sur la face d'entrée : la déviation diminue, car la trace AC'_1 du faisceau dévié monte en C'. En continuant à faire tourner le prisme dans le même sens (*sens de la flèche f*), le mouvement de C' vers C se ralentit; puis, la trace du faisceau dévié arrive en γ, et y reste, quelques instants, à peu près *stationnaire*, malgré le mouvement du prisme : la déviation est alors CAγ. Si on continue à tourner le prisme dans le même sens, l'angle d'incidence augmente encore, la face d'entrée AB_2 dépasse la position Aβ pour laquelle la déviation CAγ restait stationnaire; la trace du faisceau dévié *revient* alors vers C'. La déviation a passé par un *minimum* CAγ.

Position du rayon au minimum de déviation. — L'incidence spéciale qui correspond à la déviation minimum est celle pour laquelle l'angle d'incidence SIN est égal à l'angle d'émergence S'I'N'. Les deux angles extérieurs en I et I' étant égaux, les angles intérieurs r_1 sont égaux, et par suite leurs compléments AII' et AI'I. Le rayon intérieur II' forme avec IA et I'A un triangle isocèle, il est *perpendiculaire à la bissectrice* de l'angle A (fig. 537).

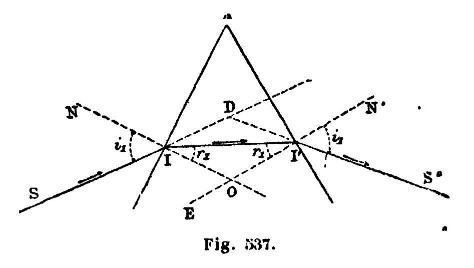


Fig. 537.

La déviation minimum est l'angle extérieur D du triangle isocèle DII', ou $2(i_1 - r_1)$. D'autre part, l'angle extérieur IOE du triangle

II'O est égal à $2r_1$ et à l'angle A du prisme $A = 2r_1$ $D = 2i_1 - A$.

477. Mesure d'un indice de réfraction. — Lorsqu'un prisme est placé par rapport à un rayon d'incidence i_1 dans la position du minimum de déviation, i_1 est lié à la déviation minimum par l'équation $D = 2i_1 - A$, d'où $i_1 = \frac{A+D}{2}$; $r_1 = \frac{A}{2}$ est l'angle de réfraction correspondant à l'angle d'incidence i_1; par suite,

$$\frac{\sin i_1}{\sin r_1} = m \quad \text{ou} \quad \frac{\sin \frac{A+D}{2}}{\sin \frac{A}{2}} = m.$$

Pour obtenir l'indice de réfraction d'une substance, par rapport à l'air, pour une couleur déterminée, on forme un prisme avec cette substance, on mesure l'angle réfringent A, puis la déviation minimum D d'un rayon réfracté à travers l'angle A. On calcule ensuite m.

478. Images vues à travers un prisme. — Quand on regarde un objet à travers un prisme, on aperçoit une image virtuelle déformée.

Si le faisceau incident est formé de rayons parallèles entre eux, venant d'une *source éloignée*, l'incidence est la même pour tous les rayons et la déviation reste la même; l'œil voit une image nette de la source.

Avec une *source placée à petite distance* et un faisceau étroit, on obtient une image nette dans deux cas particuliers.

1° ***Incidence faible et angle du prisme petit.*** — La déviation reste la même pour les différents rayons, quelle que soit leur incidence, d'après la relation $D = (m - 1)$ A. Les rayons issus d'un point S semblent, après réfraction, venir d'un même point S″ (fig. 538). Si l'incidence a lieu près du sommet, il y a rotation sans changement de distance.

2° ***Incidence de la déviation minimum.*** — Quel que soit l'angle du prisme, la déviation est sensiblement la même pour les rayons extrêmes d'un *pinceau étroit* qui tombe sous une incidence moyenne égale à celle

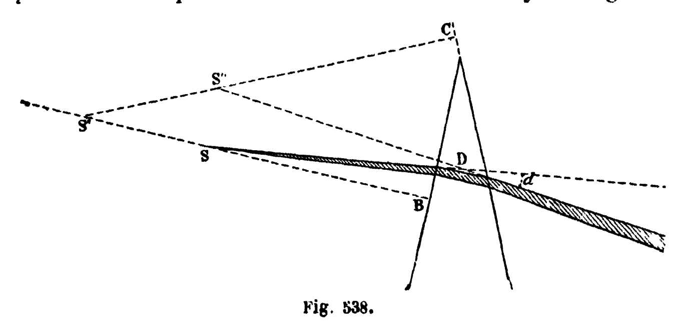


Fig. 538.

de la déviation minimum. L'angle des rayons extrêmes est alors le même à l'émergence qu'à l'incidence et les rayons réfractés viennent d'un point S″, image virtuelle du point S à travers le prisme. Les images virtuelles

vues dans ces conditions à travers le prisme sont relevées vers le sommet du prisme sans être déformées. Si l'incidence a lieu près du sommet A, il y a rotation sans changement de distance et SA = S''A.

LENTILLES

479. Sur une surface courbe de séparation de deux milieux transparents, un rayon réfracté se construit en remplaçant la surface par le plan tangent au point d'incidence.

On appelle *lentilles sphériques* des milieux transparents terminés par deux portions de surfaces sphériques ou par une surface sphérique et un plan. On distingue deux genres :

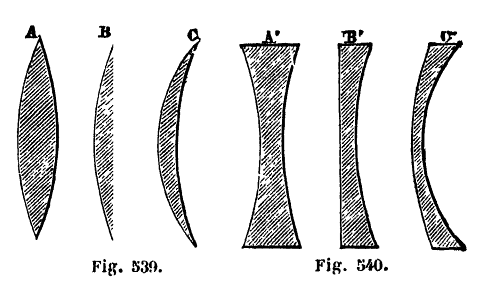


Fig. 539. Fig. 540.

1° Lentilles **convergentes,** *plus épaisses au milieu* que sur les bords : *biconvexe* A, terminée par deux surfaces convexes; *plan-convexe* B, limitée par un plan et une surface convexe; *concave-convexe* C, comprise entre deux surfaces, l'une concave, l'autre convexe, celle-ci de moindre rayon (fig. 539) ;

2° Lentilles **divergentes,** *plus minces au milieu* que sur les bords : *biconcave* A', terminée par deux surfaces dont les convexités se regardent; *plan-concave* B', limitée par un plan et une surface concave; *convexe-concave* C', comprise entre deux surfaces, l'une convexe, l'autre concave, celle-ci de moindre rayon (fig. 540).

Axe principal. — L'*axe principal* est la ligne qui joint les centres des sphères auxquelles appartiennent les deux faces; lorsqu'une face est plane, l'axe principal est la perpendiculaire abaissée du centre de la partie sphérique sur la face plane. Les *sommets* sont les points d'intersection de la lentille et de l'axe principal.

LENTILLES CONVERGENTES

480. Marche des rayons parallèles à l'axe principal. — Les rayons d'un faisceau parallèle à l'axe principal éprouvent, à l'entrée et à la sortie, deux réfractions successives qui les rejettent vers l'axe principal (fig. 541).

En pénétrant en I dans un milieu plus réfringent, un rayon SI éprouve en effet une réfraction qui le rapproche de la normale OI et l'incline vers l'axe en II'. En tombant en I' sur la seconde face, il éprouve une nouvelle réfraction qui l'écarte cette fois de la normale O'I' et l'incline encore vers l'axe. Les deux plans tangents en I et en I' forment un prisme dont la base regarde l'axe principal.

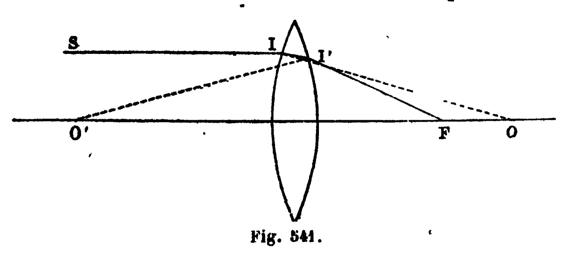
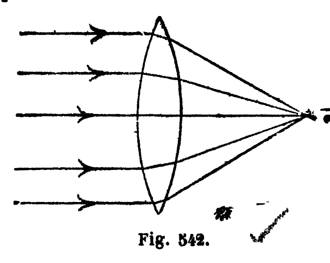


Fig. 541.

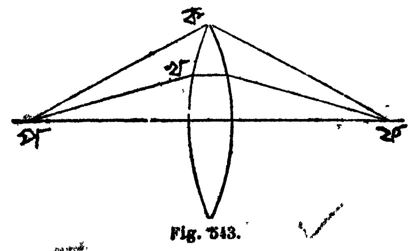
Un faisceau parallèle à l'axe principal converge, après réfraction, en un point de l'axe principal, appelé foyer principal. Le rayon réfracté qui provient du rayon incident SI coupe l'axe en un point F. Si l'ouverture des faces sphériques de la lentille est *très faible,* l'expérience fait voir que ce point, appelé *foyer principal,* est le même pour tous les rayons incidents parallèles à l'axe (fig. 542). Un faisceau cylindrique se transforme ainsi en un faisceau qui converge vers le foyer; ce faisceau conique prolongé, diverge au delà du foyer.


Fig. 542.

Si l'on reçoit en F, sur un écran, les rayons réfractés, on y voit une image de la source lumineuse à contours nets; en deçà ou au delà, le faisceau coupé par l'écran donne une tache plus étendue et d'autant plus confuse qu'on s'écarte plus de F. La distance du foyer principal à la lentille est la *distance focale principale.*

D'après la réversibilité des rayons, *un point lumineux placé au foyer* F *donne un faisceau réfracté parallèle à l'axe principal.*

481. Foyers conjugués. — Les lentilles donnent des images comme les miroirs sphériques. Les rayons issus d'un point lumineux situé sur l'axe principal d'une lentille convergente, au delà du foyer principal, convergent, après leur sortie de la lentille, en un même point P' de l'axe (fig. 543). L'image


Fig. 543.

du point se forme sur un écran placé en P'. En vertu de la réversibilité des rayons, si le point lumineux était en P', les rayons réfractés par la lentille convergeraient en P. Les points P et P' sont dits *foyers conjugués*.

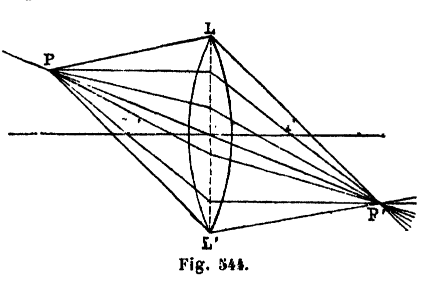


Fig. 544.

Un point lumineux P, situé en dehors de l'axe principal, mais à peu de distance de cet axe, a de même une image P' (fig. 544). P et P' sont encore des foyers conjugués.

Dans une *lentille très mince*, le foyer conjugué P' se trouve sur une droite qui joint le point lumineux P à *un point fixe particulier* C, situé sur l'axe principal et appelé **centre optique**. Le centre optique joue le rôle du centre de la sphère dans un miroir sphérique. La droite PC est un *axe secondaire*.

482. Centre optique. — Dans une lentille quelconque, un rayon qui suit l'axe principal est le seul qui traverse la lentille en ligne droite. Mais il y en a qui sortent *parallèlement* à leur direction d'entrée.

Soit un faisceau issu d'un point P quelconque et venant converger en un point P', après sa réfraction à travers une lentille (fig. 545).

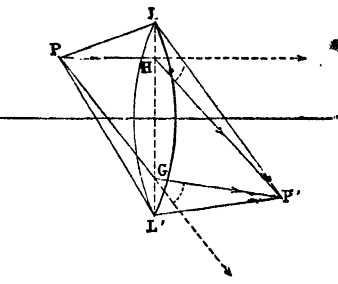


Fig. 545.

Des rayons tels que PH, qui rencontrent la lentille au voisinage de L, sont déviés au-dessous du rayon incident prolongé; d'autres PG, voisins de L', sont déviés au-dessus. En passant des uns aux autres, la déviation diminue graduellement avant de changer de sens. Par suite, entre les rayons issus de P déviés dans un sens et ceux qui sont déviés en sens contraire, il y en a un qui n'éprouve pas de déviation angulaire.

Des rayons qui sortent ainsi de la lentille *parallèlement* à leur direction d'entrée passent tous à l'intérieur de la lentille par un *point fixe* appelé centre optique.

Considérons, en effet, l'un quelconque de ces rayons lumineux, les normales OI et O'I' aux points d'incidence et d'émergence sont parallèles. Le plan (fig. 546) qui passe par l'axe principal et la normale OI contient l'autre normale O'I' qui a un point O' sur l'axe et est parallèle à OI; la droite II' est aussi dans ce plan et rencontre l'axe principal. Le point de rencontre C est fixe, car les deux triangles ICO, I'CO' ont leurs angles égaux

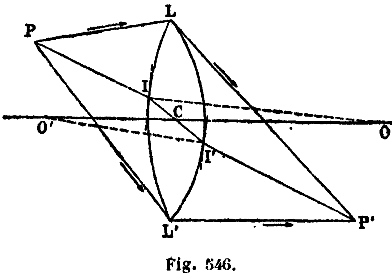


Fig. 546.

et sont semblables ; par suite :

$$\frac{CO}{CO'} = \frac{OI}{O'I'} = \frac{R}{R'}.$$

Comme il n'y a qu'un point C qui divise la droite OO' en deux segments proportionnels à deux longueurs données R et R', ce point C est le même pour tous les trajets II' correspondant à des rayons incidents et émergents parallèles.

Position du centre optique. — Graphiquement, le centre optique d'une lentille est à l'intersection de l'axe principal et d'une droite qui joint les points de contact I et I' de deux plans tangents parallèles (fig. 547). Sa position se déduit de l'équation

$$\frac{CO}{CO'} = \frac{R}{R'}.$$

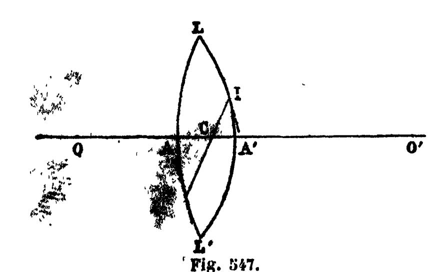


Fig. 547.

Posons $CA = x$ et $AA' = e$;
on a $CO = R - e + x \quad CO' = R' - x$

$$\frac{R - e + x}{R' - x} = \frac{R}{R'} \quad \text{d'où } x = \frac{eR'}{R + R'}$$

1° Lentille biconvexe. Si $R = R'$; $x = \frac{e}{2}$. Si $R' < R$ on a $x < \frac{e}{2}$; le centre optique est plus voisin de la face qui a le plus petit rayon.

2° Lentille plan-convexe, $R = \infty$; on a $x = 0$, le centre optique est au sommet de la surface sphérique.

3° Lentille infiniment mince, $x = 0$, le centre optique se confond avec A et A'.

Axes secondaires. — Un rayon PI, qui traverse la lentille sans déviation angulaire (fig. 546), est déplacé latéralement comme à travers une lame limitée par deux plans tangents parallèles en I et en I'. Le déplacement latéral des deux rayons parallèles PI et P'I' est négligeable pour une lentille très mince. Le rayon sans déviation est alors l'*axe secondaire* PP'.

483. Lentille infiniment mince. — Les constructions qui suivent se rapportent *à une lentille de très petite épaisseur dont les deux faces sont en contact avec un même milieu.* Les deux foyers principaux F et F' sont, alors, de part et d'autre, à *égale distance* de la lentille, même lorsque les rayons des surfaces sphériques terminales sont inégaux.

Plans focaux. — Si des rayons incidents, parallèles entre eux, sont peu inclinés sur l'axe principal, le foyer de convergence de leurs rayons réfractés *se trouve sur l'axe secondaire du faisceau.*

Les foyers qui correspondent aux axes secondaires d'un plan qui passe par l'axe principal sont sur la perpendiculaire à l'axe principal élevée en F.

Dans le plan de l'axe principal et d'un axe secondaire (fig. 548), le rayon du faisceau qui passe par le foyer principal F′ est réfracté parallèlement à l'axe principal; le point F_1 où il coupe l'axe secondaire est le yer cherché. Si nous abaissons de F_1 une perpendiculaire sur l'axe principal, le pied F de cette perpendiculaire est le foyer principal. Nous voyons en effet que FC = CF′,

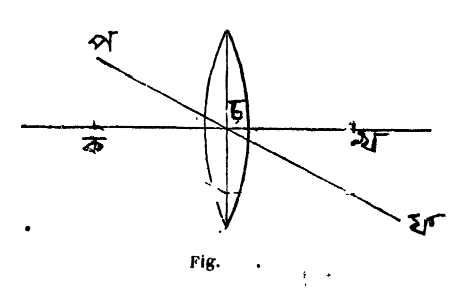


Fig.

car CF = IF_1, et dans le parallélogramme $F'CF_1I$, on a IF_1 = F′C.

En faisant tourner le plan de la figure autour de l'axe principal, la perpendiculaire FF_1 décrit un *plan focal* qui contient les foyers de tous les axes secondaires qui passent en C.

Une *lentille convergente a deux plans focaux réels,* situés de part et d'autre et à égale distance de la lentille. Les foyers et les plans focaux permettent de tracer les rayons réfractés, de déterminer le conjugué d'un point, de construire l'image d'un objet.

484. Construction du foyer conjugué d'un point lumineux. — Le conjugué P′ d'un point P sera à l'intersection de l'axe CP (principal ou secondaire) et d'un rayon réfracté. Pour obtenir un rayon réfracté, on mène, par le point P, un rayon PI (fig. 549); par le centre optique, on mène l'axe secondaire des rayons parallèles à PI, cet axe coupe le plan focal en un point F_1. Les rayons réfractés d'un faisceau parallèle à PI passent tous en F_1; IF_1 sera le rayon réfracté du rayon incident PI. Le conjugué de P est le point de rencontre P′ du rayon réfracté IF_1 et de l'axe CP.

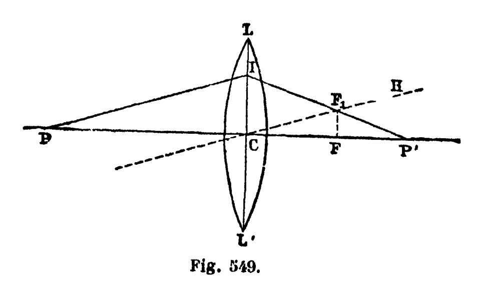


Fig. 549.

Si le point P est en dehors de l'axe principal, on n'utilise souvent que le foyer principal. On mène un rayon incident PI parallèle à l'axe prin-

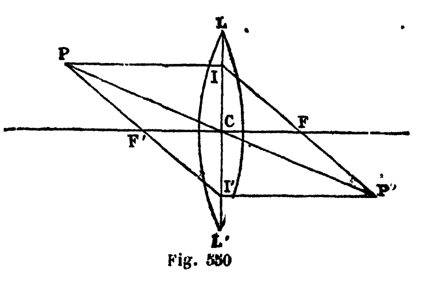


Fig. 550

cipal (fig. 550); le rayon réfracté passe par le foyer principal F; l'intersection de IF et de l'axe secondaire PC est le conjugué P′.

On peut aussi mener par P un rayon qui passe par le second foyer principal F′ (situé du même côté de la lentille); il se réfracte parallèlement à l'axe principal et rencontre PC en P′.

485. Image d'un objet. — On obtient l'image A′B′ d'un objet AB en construisant les foyers conjugués des différents points (fig. 551).

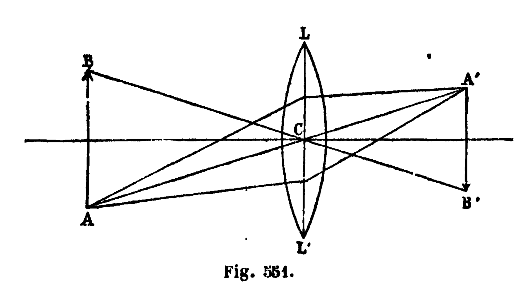


Fig. 551.

Image d'une droite perpendiculaire à l'axe principal. — Lorsque l'objet est une petite droite perpendiculaire à l'axe principal, il suffit de déterminer le conjugué d'un seul point, car *l'image est une droite* également perpendiculaire à l'axe principal.

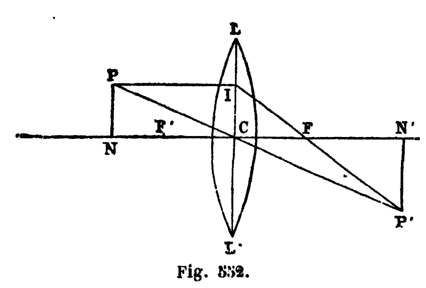


Fig. 552.

Démonstration. — Dans le plan (fig. 552) de l'axe principal et de la droite PN, construisons le conjugué P′ d'un point P, par l'intersection de l'axe secondaire PC et du rayon réfracté correspondant au rayon PI parallèle à l'axe principal, puis abaissons de P′ une perpendiculaire P′N′ sur l'axe principal.

Posons $NC = p$, $N'C = p'$, $FC = f$.

Les triangles semblables PNC, P′N′C de sommet C donnent :

$$\frac{P'N'}{PN} = \frac{N'C}{NC} = \frac{p'}{p}.$$

D'autre part, les triangles semblables ICF, P′N′F de sommet F, donnent, en remarquant que $IC = PN$:

$$\frac{P'N'}{IC} \quad \text{ou} \quad \frac{P'N'}{PN} = \frac{N'F}{CF} = \frac{p'-f}{f}.$$

$$\text{de là} \quad \frac{p'}{p} = \frac{p'-f}{f} \quad \text{ou} \quad pf + p'f = pp'$$

et, en divisant les deux membres par $pp'f$,

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{f}.$$

Si p est constant, p' l'est aussi. Or, p étant constant pour tout point d'une petite droite PN perpendiculaire à l'axe, l'image d'un point de cette droite se trouve sur la droite P'N' dont le pied est distant de p' du centre optique. Un point P de PN a son image en P' sur P'N'. Les droites PN et P'N' sont dites *conjuguées* (1).

Positions et grandeurs des images. — Les triangles semblables PNC, P'N'C conduisent dans tous les cas à $\frac{P'N'}{PN}=\frac{p'}{p}$. Une seconde valeur du rapport $\frac{I}{O}$ de l'image à l'objet se déduit des triangles semblables ICF, P'N'F de sommet F (IC = PN).

I. Droite réelle, de l'infini jusqu'au foyer F'. — D'après la construction géométrique, l'image est *réelle* et *renversée* (fig. 553).

$$\frac{P'N'}{PN}=\frac{N'F}{CF}=\frac{p'-f}{f}.$$

$$\frac{p'}{p}=\frac{p'-f}{f}$$

d'où $pf+p'f=pp'$

et $\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{f}$ (2).

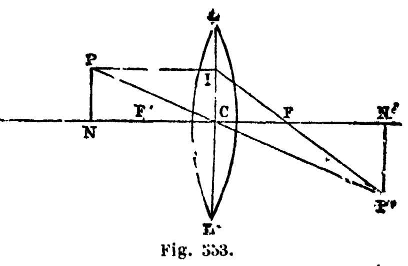


Fig. 553.

II. Droite réelle, entre le foyer et la lentille. — L'image est *virtuelle, droite,* plus grande que l'objet (fig. 555).

(1) En faisant tourner la figure autour de l'axe principal, les *droites conjuguées* PN et P'N' décrivent des *plans conjugués*. L'image d'un plan perpendiculaire à l'axe est ainsi un autre plan perpendiculaire à l'axe. On obtient l'image d'un objet plan perpendiculaire à l'axe en déterminant le conjugué P' d'un point P du plan et en abaissant de P' un plan perpendiculaire à l'axe. Un plan perpendiculaire à l'axe principal qui s'éloigne indéfiniment a pour conjugué un plan focal.

(2) On obtient cette relation, par des formules plus symétriques, en utilisant les deux constructions d'un conjugué P', par la considération des triangles ICF, II'P' et des triangles I'CF' et I'IP (fig. 554).

IC = PN = O (*objet*),

I'C = P'N' = I (*image*).

1° Triangles semblables ICF, II'P' :

$$\frac{IC}{II'}=\frac{CF}{I'P'} \text{ ou } \frac{O}{O+I}=\frac{f}{p'} \quad (1)$$

2° Triangles semblables I'CF', I'IP :

$$\frac{I'C}{II'}=\frac{CF'}{IP} \text{ ou } \frac{I}{O+I}=\frac{f}{p} \quad (2)$$

ajoutons (1) et (2), $1=\frac{f}{p'}+\frac{f}{p}$.

Les autres cas se traitent par les mêmes triangles.

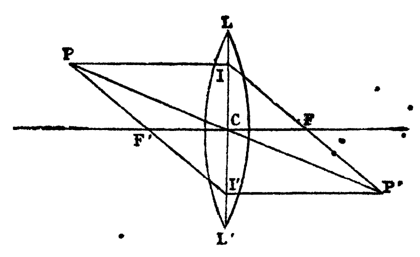


Fig. 554.

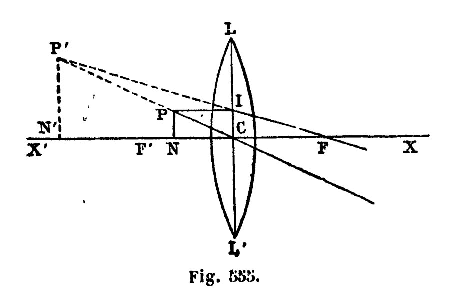


Fig. 555.

$$\frac{P'N'}{PN} = \frac{N'F}{CF} = \frac{p'+f}{f}$$

$$\frac{p'}{p} = \frac{p'+f}{f}$$

d'où $$p'f - pf = pp'$$

et $$\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$$

III. Droite virtuelle, au delà de la lentille. — Si la lentille n'existait pas, les rayons incidents, qui sont convergents, formeraient une image PN, qui est l'objet; l'objet est dit *virtuel* (fig. 556).

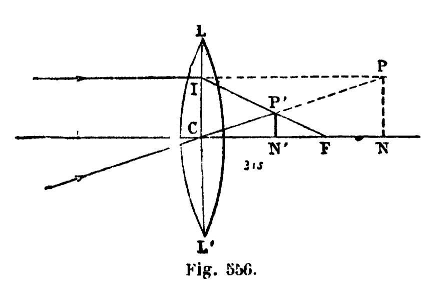


Fig. 556.

$$\frac{P'N'}{PN} = \frac{N'F}{CF} = \frac{f-p'}{f}$$

$$\frac{p'}{p} = \frac{f-p'}{f}$$

d'où $$pf - p'f = pp'$$

$$\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f}.$$

L'image est *réelle* et *droite,* plus petite que l'objet.

486. Remarques générales. — Dans tous les cas, l'image et l'objet sont toujours vus du centre optique, sous un même angle, et le rapport de deux dimensions homologues de l'image et de l'objet est égal au rapport de leurs distances à la lentille :

$$\frac{I}{O} = \frac{CN'}{CN} = \frac{p'}{p}.$$

Les pieds N et N′ de la droite et de son image étant conjugués, les relations entre p et p' s'appliquent aux variations de position de l'image d'un point qui se déplace sur l'axe principal.

Lorsque le pied de l'objet parcourt l'axe principal entier, le conjugué parcourt l'axe dans le même sens; le point de départ est seul différent pour N et N′.

L'image devient deux fois égale à l'objet: 1° en croissant, l'image et l'objet sont alors symétriquement placés à la distance $2f$; 2° en décroissant, dans le plan C [1].

La forme de l'image est indépendante de la grandeur et de la forme de l'ouverture de la lentille; mais l'intensité est proportionnelle à la surface de cette ouverture.

---

(1) $\frac{I}{O}$ se présente alors sous la forme $\frac{0}{0}$, mais I et O diffèrent d'autant moins que p est plus petit, et la valeur limite du rapport est 1.

Les trois relations arithmétiques entre p, p' et f (1) se déduisent de la relation $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$ en faisant la construction de l'image, et en affectant p ou p' du signe $+$ lorsque la droite correspondante (objet ou image) est réelle, et du signe $-$ lorsqu'elle est virtuelle. L'image est droite si les termes en p' et p ont des signes contraires, elle est renversée s'ils ont le même signe.

Formule générale. — Les relations $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$ et $\frac{I}{O} = \frac{p'}{p}$ peuvent donner sans construction, **la position**, la **nature** et la **grandeur** de l'image.

On prend pour origine des distances le centre optique C de la lentille; on *convient* de compter positivement le segment $CN = p$ quand le point N est du côté de la lumière incidente; on *convient* de compter le segment $CN' = p'$ positivement si N' est du côté de la lumière réfractée.

p étant donné, on résout l'équation par rapport à p'. Si cette résolution donne pour p' une valeur positive, cela indique que l'image est *réelle* et située du côté de la lumière réfractée. Si p' est négatif, l'image est *virtuelle* et située du côté de la lumière incidente.

Le rapport de grandeur de l'image à l'objet est $\frac{p'}{p}$ en valeur absolue ; l'image est droite si $\frac{p'}{p}$ est positif, elle est renversée si $\frac{p'}{p}$ est négatif.

La relation $\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$ conduit à $p' = \frac{pf}{f-p} = \frac{f}{\frac{f}{p} - 1}$.

Si $p = +\infty$ $\quad p' = -f \quad \frac{I}{O} = -\frac{f}{p} \quad I = -\frac{O}{p} f$ (2)

Relation entre la distance focale principale, l'indice de la substance et les rayons des surfaces sphériques terminales.

Dans un plan qui contient l'axe principal, considérons des rayons parallèles à l'axe. Aux deux points où l'un de ces rayons la traverse, la lentille peut être remplacée par un prisme qui aurait pour faces les plans tangents à la lentille en ces points; un rayon incident se propage

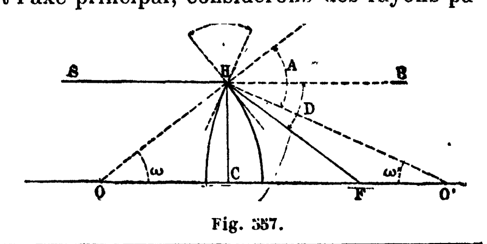


Fig. 357.

(1) On pourrait aussi compter positivement les segments $CN = p$ et $CN' = p'$, quand ils se trouvent du côté de la lumière incidente et négativement quand ils sont du côté opposé. p étant donné, on résout l'équation par rapport à p'.

Si p' est positif, l'image est virtuelle et située du côté de la lumière incidente. Si p' est négatif, l'image est réelle et située du côté de la lumière réfractée. p négatif correspond à un point de concours formé par des rayons convergents et situé du côté de la lumière réfractée.

(2) Pour le Soleil dont le diamètre apparent est 32', on a $\frac{O}{p} = 0{,}009$.

dans une section droite du prisme. La lentille étant très mince, les angles de ces prismes sont très petits. Comme les rayons tombent sur la lentille sous de petites incidences, leur déviation est sensiblement la même pour tous. Soit A l'angle du prisme des deux plans tangents au sommet H de la lentille, l'angle de déviation est $D = (m-1)$ A.

Soit $HC = h$ et $CF = f$; en confondant D et sa tangente, $D = \frac{h}{f}$.

D'autre part, A étant l'angle extérieur du triangle OHO',

$$A = \omega + \omega' = \frac{h}{R} + \frac{h}{R'}, \quad \text{d'où} \quad \frac{1}{f} = (m-1)\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}\right).$$

Distances comptées à partir des foyers. — Posons $F'N = \varpi$ $FN' = \varpi'$ (fig. 553).

La relation $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$ donne $\frac{p'}{p} = \frac{p-f}{f}$.

Elle devient $\frac{\varpi' + f}{\varpi + f} = \frac{\varpi'}{f}$, d'où $\varpi\varpi' = f^2$.

La même équation s'applique à tous les cas.

487. Vérifications expérimentales. — Pour suivre les variations de grandeur et de position de l'image d'un objet, on dispose perpendiculairement à l'axe principal une bougie et un écran, la bougie ayant le milieu de sa flamme sur l'axe principal (fig. 558).

Quand la bougie est très éloignée, on reçoit sur l'écran une image petite et renversée, la distance de l'image à la lentille est la distance focale principale. On approche la bougie jusqu'au double de la distance focale; à la même distance de la lentille, de l'autre côté,

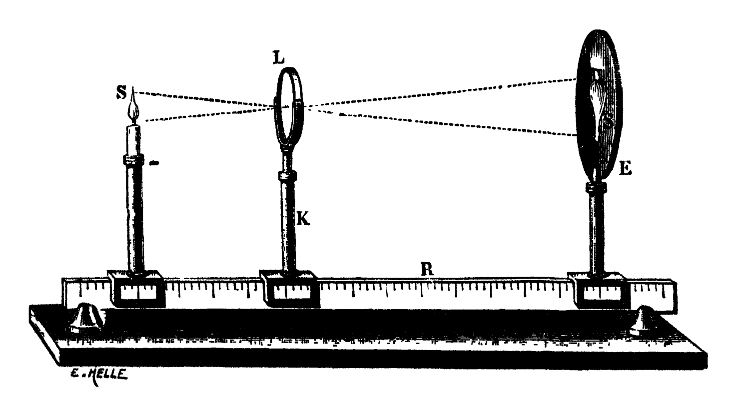


Fig. 558.

on reçoit sur l'écran, une image renversée égale à l'objet. Si l'on conduit peu à peu la bougie jusqu'au foyer, il faut éloigner en même temps l'écran pour avoir une image nette qui est renversée et

agrandie. En plaçant la bougie tout près du foyer, mais encore un peu au delà, l'image est très éloignée et très amplifiée.

Une image réelle est vue quand l'œil de l'observateur est placé dans le cône des rayons qui divergent après la formation de l'image. Elle est vue, pour toute position de l'observateur, si on la reçoit sur un écran; *elle est visible par diffusion*. Si on pousse la bougie entre le foyer principal et la lentille, l'œil placé de l'autre côté de la lentille dans le cône des rayons divergents voit une image agrandie et virtuelle (fig. 559).

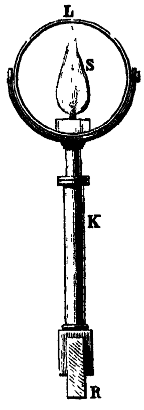


Fig. 559.

488. Mesure de la distance focale d'une lentille convergente. — On peut employer plusieurs procédés. 1° On fait tomber sur la lentille un faisceau de rayons solaires parallèles à l'axe principal, et on cherche à obtenir sur un écran une image du Soleil, aussi nette et aussi petite que possible. La distance de l'image à la lentille est la distance focale.

2° On place un objet lumineux perpendiculairement à l'axe principal à une distance p, assez grande pour qu'une image réelle se forme *de l'autre côté*, à une distance p' de la lentille; on mesure les deux distances et on applique l'équation $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$.

3° Il est plus précis de placer un objet *à une distance $2f$ de la lentille* L; on obtient, de l'autre côté, une image *égale à l'objet et renversée,* située à la même distance $2f$. Un support K portant la lentille L est posé sur une règle divisée horizontale (fig. 560). D'un côté

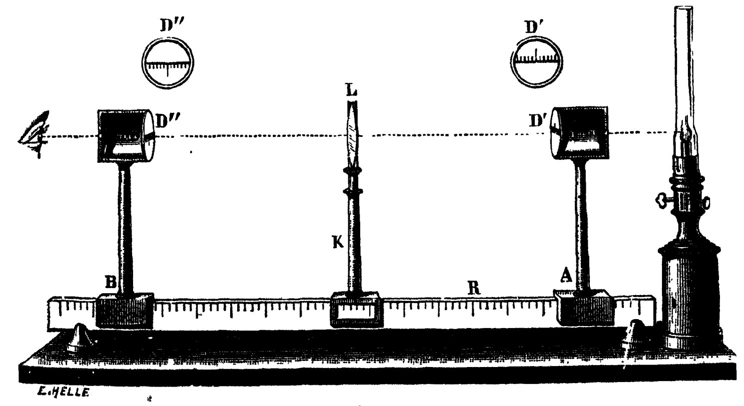


Fig. 560.

de la lentille, à la hauteur de son axe principal, un demi-disque en verre dépoli D′, divisé en millimètres, est éclairé par une lampe, et sert d'objet lumineux. De l'autre côté de la lentille, est un autre demi-disque D″, identique, sur lequel la même division est disposée en sens inverse. On déplace à la fois les supports A et B des deux demi-disques, en les maintenant à égale distance de la lentille, jusqu'à ce que l'image des traits du demi-disque D′ vienne se superposer aux traits de D″, alors $D'D'' = 4f$.

La chambre noire photographique, l'appareil de projection, les instruments d'optique sont des applications des lentilles convergentes.

LENTILLES DIVERGENTES

489. Marche des rayons parallèles à l'axe principal. — En traversant une lentille divergente, des rayons parallèles à l'axe se transforment en un faisceau divergent. Un rayon SI, réfracté en I, se rapproche de la normale OI et s'écarte de l'axe suivant II′. Une nouvelle réfraction en I′ l'éloigne de la normale O′I′ et l'écarte encore de l'axe (fig. 562). Si *l'ouverture* des faces terminales de la lentille est *très faible,* les prolongements des rayons divergents se rencontrent en *un même* point F situé du côté de la lumière incidente, F est le *foyer principal virtuel* de la lentille (fig. 563), sa distance à la lentille est la ***distance focale principale.***

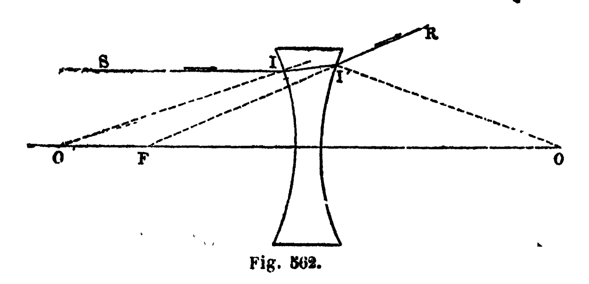


Fig. 562.

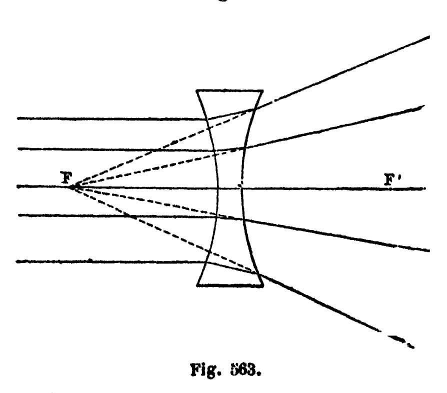


Fig. 563.

490. Foyers conjugués. — Sur l'axe principal d'une lentille divergente plaçons un point lumineux P : les rayons issus de ce point sortent en divergeant, leurs prolongements se rencontrent en un point P′, situé du

même côté que le point lumineux (fig. 564), c'est un *foyer virtuel*. D'après la réversibilité, P et P' sont des *foyers conjugués.*

Un point lumineux placé en dehors de l'axe principal, mais voisin de cet axe, a encore un foyer conjugué.

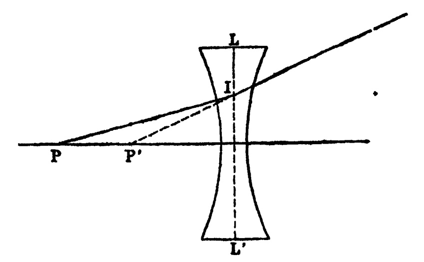


Fig. 564.

491. Centre optique. — Le trajet intérieur II' d'un rayon lumineux qui traverse une lentille divergente *sans changer de direction* rencontre l'axe principal en un point C qui est fixe.

En effet, si aux points I et I', les rayons OI et O'I' sont parallèles, les triangles OIC, O'I'C sont semblables (fig. 565) et on a l'égalité :

$$\frac{CO}{CO'} = \frac{OI}{O'I'} = \frac{R'}{R'}$$

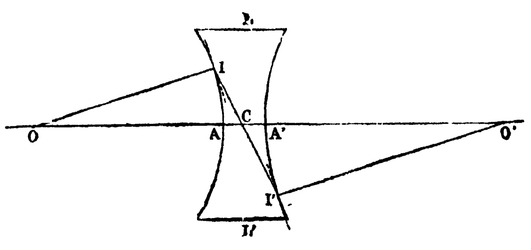


Fig. 565.

Le point C étant le seul qui puisse diviser la droite OO' en deux segments proportionnels à deux longueurs données R et R', ce point de rencontre avec l'axe est le même pour tous les trajets II' correspondant à des rayons *incidents et émergents parallèles.*

Position du centre optique. — Posons CA $= x$, AA' $= e$; de $\frac{CO}{CO'} = \frac{R}{R'}$ on déduit $x = \frac{eR}{R + R'}$. Lorsque R $=$ R', on a $x = \frac{e}{2}$.

Pour une lentille infiniment mince, $x = 0$; le centre optique coïncide avec A et avec A'. Un rayon qui n'a pas de déviation angulaire sort, dans ce cas, sans déplacement latéral.

492. Lentille infiniment mince. — Si les deux faces de la lentille sont *dans un même milieu*, les deux foyers principaux F et F' sont situés, de part et d'autre, à *égale distance de la lentille,* même lorsque les rayons des deux surfaces sphériques sont inégaux.

Le foyer principal F, situé du côté de la lumière incidente, joue dans les constructions le même rôle que le foyer désigné par la même lettre dans le cas des lentilles convergentes.

Le conjugué P' d'un point P placé en dehors de l'axe principal se trouve sur la droite qui joint le point P au centre optique C. La droite PC est un **axe secondaire**.

Plans focaux. — Des rayons parallèles donnent un faisceau

réfracté qui a son sommet sur l'axe secondaire du faisceau.

Le rayon du faisceau qui passerait par le foyer principal F′ se réfracte parallèlement à l'axe principal (fig. 566); le point F_1 où le prolongement du rayon réfracté rencontre l'axe secondaire du faisceau est un foyer secondaire. Abaissons de F_1 une perpendiculaire sur l'axe principal, le pied de cette perpendiculaire est le foyer principal. Le plan perpendiculaire à l'axe principal mené en F est un *plan focal*. Il y a deux plans focaux virtuels situés de part et d'autre de la lentille.

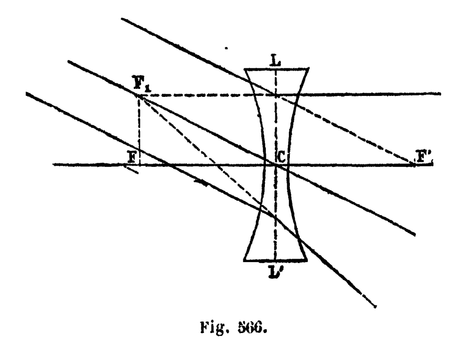


Fig. 566.

493. Construction du conjugué d'un point. — Le conjugué P′ d'un point P est à l'intersection de l'axe CP (principal ou secondaire) et d'un second rayon réfracté. Ayant mené par le point P un rayon PI (fig. 567), on trace par le centre optique l'axe secondaire CR des rayons parallèles à PI, cet axe coupe le plan focal en F_1. Les rayons réfractés d'un faisceau parallèle à PI passant tous en F_1, le rayon réfracté

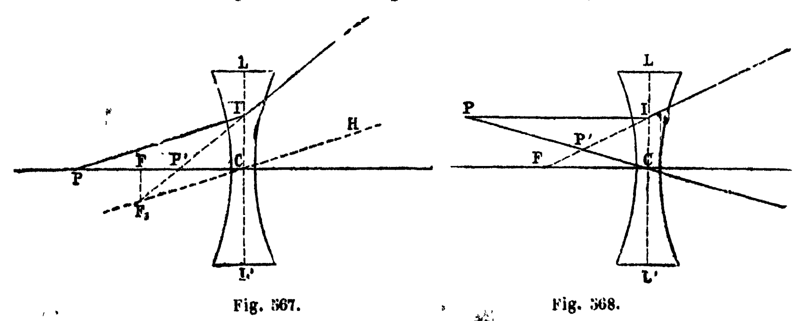


Fig. 567. Fig. 568.

du rayon incident PI est IF_1. Le conjugué cherché est l'intersection P′ de IF_1 et de CP.

Si le point P ne se trouve pas sur l'axe principal, on n'utilise souvent que le foyer principal. On mène un rayon PI parallèle à l'axe principal; le rayon réfracté passe par le foyer F, l'intersection de IF et de l'axe secondaire PC est le conjugué P′ (fig. 568).

494. Image d'un objet. — On obtient l'image d'un objet en construisant les images des différents points. Comme pour une lentille convergente, l'*image d'une petite droite perpendicu-*

laire à l'axe principal est une droite perpendiculaire à l'axe.

Droite perpendiculaire à l'axe principal. Positions et grandeurs des images. — Pour construire l'image d'une petite droite PN, perpendiculaire à l'axe principal, on détermine le foyer conjugué P′ d'un point P de la droite, et on abaisse du point P′ une perpendiculaire sur l'axe. Posons NC $= p$, N′C$= p'$ et FC $= f$.

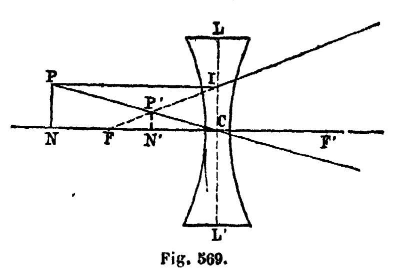
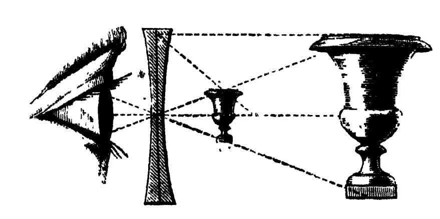


Fig. 569.

Les triangles semblables PNC et P′N′C de sommet C donnent, *dans tous les cas,* $\frac{P'N'}{PN} = \frac{p'}{p}$. Une seconde valeur du rapport $\frac{I}{O}$ est fournie par les triangles semblables ICF, P′N′F de sommet F; on remarque que IC $=$ PN. On égale les deux valeurs du rapport.

I. **Droite réelle située en avant de la lentille.** — D'après la construction (fig. 569), l'image est *virtuelle, droite* et plus petite que l'objet ; elle se forme entre le foyer et la lentille (fig. 570).


Fig. 570.

$$\frac{P'N'}{PN} = \frac{N'F}{CF} = \frac{f-p'}{f},$$

$$\frac{p'}{p} = \frac{f-p'}{f}$$

d'où $fp' - fp = -pp'$,

et $\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = -\frac{1}{f}$.

II. **Droite virtuelle située entre la lentille et le foyer principal.** — Sans la lentille divergente, la lumière incidente formerait une image entre C et F′ (fig. 571).

Parmi les rayons qui viendraient concourir en P, nous considérons celui qui est parallèle à l'axe et celui qui suit l'axe secondaire. L'image est *droite, réelle,* plus grande que l'objet.

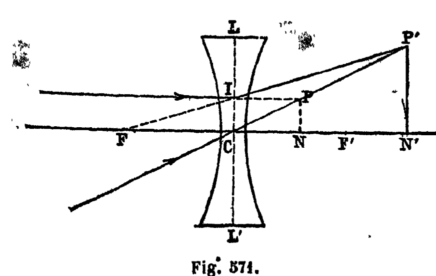


Fig. 571.

$$\frac{P'N'}{PN} = \frac{N'F}{CF} = \frac{p'+f}{f}.$$

$$\frac{p'}{p} = \frac{p'+f}{f};$$

d'où $fp' - fp = pp'$

et $\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = -\frac{1}{f}$.

III. **Droite virtuelle située au delà du foyer.** — Il s'agit encore de lumière convergente, mais moins convergente que dans le cas précédent (fig. 572).

L'image est *renversée* et *virtuelle;* dans le trapèze PIFC, la base CF est plus petite que IP ; les prolongements géométriques des deux rayons réfractés se rencontrent en avant de la lentille.

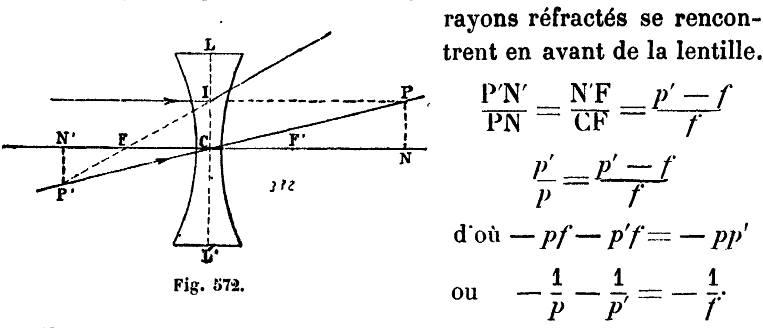


Fig. 572.

$$\frac{P'N'}{PN} = \frac{N'F}{CF} = \frac{p'-f}{f}$$

$$\frac{p'}{p} = \frac{p'-f}{f}$$

d'où $-pf - p'f = -pp'$

ou $-\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = -\frac{1}{f}.$

495. Remarques générales. — Du centre optique, l'image et l'objet sont toujours vus sous un même angle.

Le rapport de deux dimensions homologues de l'image et de l'objet est égal au rapport de leurs distances à la lentille.

Le pied N de l'objet et son conjugué N' parcourent en même temps l'axe dans le même sens, avec un point de départ qui est différent pour N et N'.

L'image devient égale à l'objet : 1° en croissant, lorsqu'elle passe en même temps que lui par le centre optique C ; 2° en décroissant, quand l'image et l'objet se trouvent tous deux symétriquement placés à une distance $2f$ de la lentille.

Les trois équations obtenues avec les lentilles divergentes

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = -\frac{1}{f}, \quad -\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = -\frac{1}{f} \quad \text{et} \quad -\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = -\frac{1}{f}$$

se déduisent de l'équation $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = -\frac{1}{f}$, en affectant p et p' du signe $+$ s'ils se rapportent à des images ou objets réels, et du signe — s'ils se rapportent à des images ou objets virtuels.

Formule générale. — En comptant positivement les segments p et p' quand ils se trouvent du côté de la lumière incidente, et négativement quand ils se trouvent du côté opposé, la discussion algébrique de l'équation $\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = -\frac{1}{f}$ donne la *position*, la *nature*, la *grandeur* de l'image.

Si $p = +\infty \quad p' = f.$

La distance focale f de la lentille s'exprime en fonction de l'indice de réfraction m de la substance et des rayons de courbure R et R' des faces terminales, par la relation $\frac{1}{f} = (m-1)\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}\right).$

496. Convergence d'une lentille. — On caractérise une lentille par sa *convergence,* ou l'inverse $\frac{1}{f}$ de sa distance focale. L'unité de convergence ou **dioptrie** est la convergence d'une lentille dont la distance focale est 1 mètre. Pour 25 centimètres de distance focale, la convergence est $\frac{1}{0,25}$ ou 4 dioptries; pour une lentille divergente de même distance focale, elle est — 4.

497. Lentilles minces juxtaposées. — Un système de deux lentilles minces juxtaposées et dont les axes principaux coïncident, possède une convergence égale à la *somme algébrique* des convergences des lentilles qui le composent.

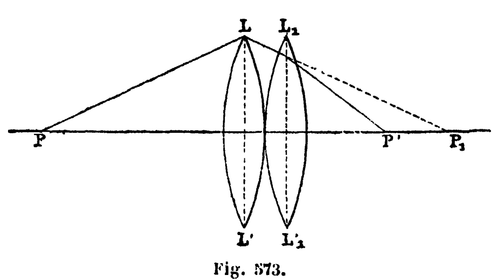


Fig. 573.

1° *Lentilles, toutes deux convergentes* (fig. 573). L'objet lumineux étant éloigné, si la première lentille était seule (**485**), on aurait $\frac{1}{p}+\frac{1}{p_1}=\frac{1}{f}$.

La seconde lentille reçoit de la lumière convergente, d'où l'équation : $-\frac{1}{p_1}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{f'}$.

En ajoutant, on a : $\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{f}+\frac{1}{f'}$. C'est l'équation d'une lentille convergente unique, de convergence $\frac{1}{F}=\frac{1}{f}+\frac{1}{f'}$.

2° *Lentille convergente et lentille divergente* (fig. 574). Pour un objet éloigné placé devant la lentille convergente, l'équation est

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{p_1}=\frac{1}{f}.$$

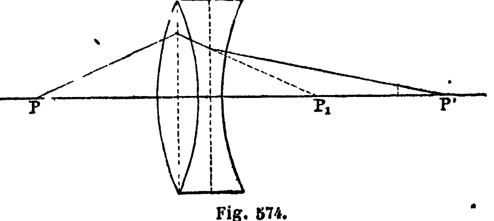


Fig. 574.

Si le rayon réfracté par la lentille convergente rencontre l'axe principal entre la lentille divergente et son foyer, l'équation de la lentille divergente est $\frac{1}{p'}-\frac{1}{p_1}=-\frac{1}{f'}$.

En ajoutant : $\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{f}-\frac{1}{f'}$.

L'ensemble est convergent, avec une convergence $\frac{1}{f} - \frac{1}{f'}$ (1).

Le système de plusieurs lentilles minces, convergentes ou divergentes, accolées, de distances focales f_1, f_2,... f_n, se comporte comme une lentille unique de convergence $\frac{1}{F} = \Sigma \frac{1}{f_1}$.

498. Mesure de la distance focale f' d'une lentille divergente. — Contre la lentille divergente on applique une lentille convergente de distance focale f, de façon à former un système convergent, dont on mesure la distance focale F. D'après ce qui précède, $\frac{1}{F} = \frac{1}{f} - \frac{1}{f'}$. On a $\frac{1}{f} = \frac{1}{f'}$, en *neutralisant* la lentille divergente par une lentille convergente (2).

499. Aberration de sphéricité. — Pour une grande ouverture de la lentille, les angles d'incidence ne sont pas tous très petits, les rayons réfractés issus d'un point ne concourent plus en un point unique et les images n'ont pas de netteté.

Les rayons *marginaux* sont plus déviés par la réfraction que les rayons *centraux* et font leur image en un point F'_1, plus rapproché de la lentille que le foyer F' des rayons centraux (fig. 575). On le reconnaît en appliquant sur une lentille convergente un écran noir percé de trous inégalement éloignés de l'axe; si l'on découvre alternativement des ouvertures voisines du centre et des ouvertures voisines du bord, les rayons qui passent par des trous voisins de l'axe font leurs images le plus loin de la lentille.

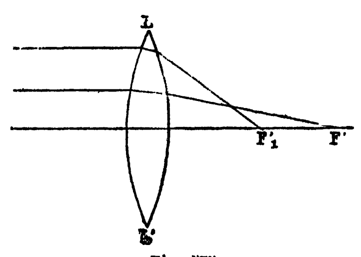


Fig. 575.

Cette imperfection, dite *aberration de sphéricité,* s'accentue pour une courte distance focale. On l'atténue en couvrant la lentille d'un diaphragme qui n'admet que les rayons centraux. L'*aberration longitudinale* est la distance $F'F'_1$ des foyers des rayons centraux et marginaux d'un faisceau incident parallèle à l'axe.

---

(1) Dans le cas où le point de rencontre P_1 se place au delà du foyer de la lentille divergente, le point P' est reporté en avant du système.

Première équation : $\frac{1}{p} + \frac{1}{p_1} = \frac{1}{f}$; Deuxième équation : $-\frac{1}{p_1} - \frac{1}{p'} = -\frac{1}{f'}$

d'où, en ajoutant : $\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = \frac{1}{f} - \frac{1}{f'}$.

(2) En regardant un objet à travers le système neutre et en imprimant au système de légers déplacements, parallèles à son plan et au plan de l'objet, l'image ne subit aucun déplacement.

Pour une même distance focale, on diminue l'aberration de sphéricité en prenant une lentille plan convexe ou plan concave dont la face courbe est tournée vers la lumière incidente.

En remplaçant une lentille de forte courbure par deux lentilles de courbures plus faibles et dont l'ensemble a la même distance focale que la lentille primitive, on peut, par un choix convenable des rayons de courbure, diminuer notablement l'aberration de sphéricité.

Lentille des phares. — Dans la lentille à échelons de Fresnel, à courte distance focale, employée dans les phares, l'aberration est corrigée de manière à utiliser une grande surface réfringente. Une lentille convergente C est entourée d'anneaux concentriques en verre A, B... dont les courbures sont choisies pour que les rayons parallèles à l'axe convergent au foyer principal de la lentille C (fig. 576). Inversement, pour une lumière placée au foyer, les rayons réfractés sont parallèles à l'axe principal de la lentille centrale.

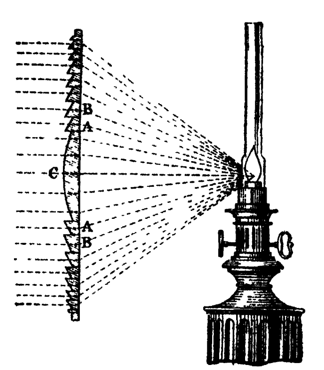


Fig. 576.

DOUBLE RÉFRACTION

Substances biréfringentes. — Les corps cristallisés transparents appartenant à un système cristallin autre que le système cubique, dédoublent un rayon lumineux qui les traverse; il y a donc deux rayons réfractés au lieu d'un seul. Ces corps sont dits biréfringents, le dédoublement se nomme *double réfraction*.

On distingue deux groupes de substances biréfringentes : 1° ***Cristaux* dits *à un axe*** dont la forme cristalline présente un axe de symétrie, comme le *spath d'Islande*, le *quartz* ou cristal de roche, etc.; 2° ***Cristaux* dits *à deux axes*** : *mica, gypse*, etc.

500. Corps biréfringents à un axe. — Par sa transparence et la grosseur de ses cristaux, le *spath d'Islande* est particulièrement propre à l'étude de la double réfraction. C'est du *carbonate de calcium* pur, qu'on rencontre en cristaux rhomboédriques Un ***rhomboèdre*** (fig. 577) est un solide qui présente six faces égales, comme un cube, mais ces faces sont des losanges. Les sommets sont des angles trièdres. Pour deux des huit sommets, A et A', opposés l'un à l'autre, les trois arêtes limitent, à leur point de concours, trois angles plans égaux (1). La ligne qui joint les deux sommets A et A' est l'*axe cristallographique*.

(1) Aux autres sommets du cristal, les arêtes limitent un angle obtus et deux angles aigus, supplémentaires de l'angle obtus.

Tout rayon lumineux qui traverse le spath d'Islande suivant une parallèle à l'axe cristallographique, ne subit pas de double réfraction. La direction de l'axe cristallographique est appelée ***axe optique***.

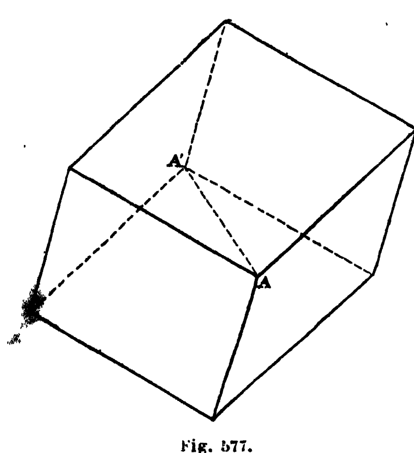


Fig. 577.

501. Caractères des deux rayons réfractés. — L'un des deux rayons, dit ***rayon ordinaire***, suit toujours les deux lois de la réfraction simple; l'autre ***rayon***, dit ***extraordinaire***, ne suit, ***sauf*** *dans des cas particuliers*, ni l'une ni l'autre des deux lois (1). C'est à ces cas particuliers que se rapportent les principales expériences de double réfraction.

Section principale. — On appelle section principale toute section qui contient une parallèle à l'axe optique et qui est perpendiculaire à la face d'entrée (naturelle ou artificielle) dans le cristal.

1° ***Le plan d'incidence est une section principale.*** — Quand le rayon incident se trouve dans une section principale, le rayon extraordinaire *reste, comme le rayon ordinaire, dans la section principale* et obéit ainsi à la première loi de la réfraction simple, mais il ne suit pas la loi des sinus.

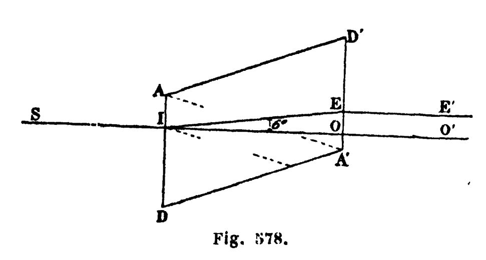


Fig. 578.

Dans la fig. 578, un faisceau incident étroit est normal à l'une des faces d'un cristal de spath d'Islande. Le rayon extraordinaire se trouve dans le plan qui passe par le rayon incident et par une parallèle à l'axe optique menée par le point d'incidence; il reste dans ce plan quand on fait tourner le cristal autour du rayon incident. Sur un écran normal au rayon incident, le rayon extraordinaire trace une circonférence autour du rayon ordinaire qui va au centre.

Dans la fig. 579, la face d'entrée est une face du cristal. Le cristal est orienté de façon à placer horizontalement les arêtes AD′ et DA′ du rhomboèdre. Si le rayon incident est horizontal et parallèle à ces arêtes, les deux rayons réfractés restent dans le

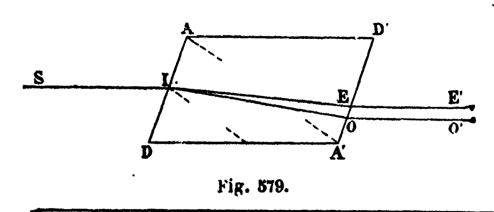


Fig. 579.

(1) Dans les cristaux à deux axes, les deux rayons peuvent ne suivre aucune des deux lois de Descartes.

plan d'incidence et ils sortent, en OO′ et EE″, parallèlement à leur direction d'entrée. Laissant le rayon incident SI fixe, si l'on fait tourner la section principale de telle manière que les côtés du parallélogramme AD′ et DA′ soient constamment parallèles à SI, les deux rayons réfractés restent dans la section principale et tournent avec elle.

2° ***Le plan d'incidence est perpendiculaire à l'axe optique.*** — Dans ce cas, le rayon extraordinaire obéit aux deux lois de la réfraction simple. Son indice de réfraction est alors 1,48 (1).

3° Dans les autres positions du plan d'incidence, le rayon extraordinaire n'obéit à aucune des lois de Descartes ; son indice varie de 1,65 à 1,48.

DISPERSION

DÉCOMPOSITION DE LA LUMIÈRE BLANCHE

L'étude du phénomène de la réfraction à travers un prisme se rapportait à une couleur déterminée (**475**). Avec la lumière blanche, outre la déviation, on observe une *dispersion* des couleurs.

502. Dispersion de la lumière. — Par un trou circulaire étroit O (4 à 5 millimètres de diamètre), pratiqué dans le volet d'une chambre noire, on fait passer un faisceau cylindrique de lumière solaire, ce

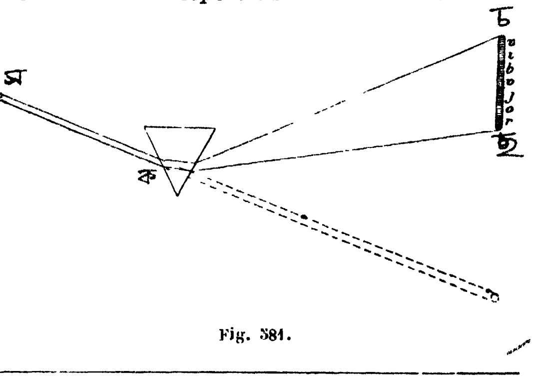


Fig. 581.

(1) On mesure les indices ordinaire et extraordinaire d'un cristal biréfringent à un axe en taillant un prisme dont l'arête réfringente est dirigée suivant l'axe optique et on détermine les indices par la *méthode du minimum de déviation* (**477**), appliquée successivement au rayon extraordinaire et au rayon ordinaire (fig. 580). Pour le spath, $m_e - m_o$ (1,48 — 1,65) est négatif ; le rayon extraordinaire est moins dévié que l'ordinaire ; le spath est dit *négatif*. Pour le quartz $m_e - m_o$ (1,55 — 1,54) est positif et le rayon extraordinaire est plus dévié ; le quartz est dit *positif*. Les cristaux biréfringents à un axe sont les uns négatifs et les autres positifs. Lorsque, dans un cristal négatif, on mène, au point d'incidence d'un rayon lumineux, une parallèle à l'axe optique, le rayon extraordinaire est celui qui s'écarte le plus de cette direction. Dans un cristal positif, c'est le rayon ordinaire.

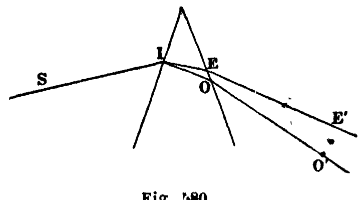


Fig. 580.

faisceau donne sur un écran une image ronde et blanche O′. Si, sur le trajet des rayons, on interpose un prisme de verre P, à arête horizontale, qui réfracte le faisceau dans sa section droite, on voit sur l'écran (fig. 581) une image *déviée vers la base du prisme*, **allongée verticalement**, c'est-à-dire *perpendiculairement à l'arête réfringente*. L'image, appelée *spectre solaire*, présente des couleurs *r, o, j, v, b, i, v*, qui se fondent insensiblement les unes dans les autres; on en distingue sept principales qui se succèdent dans l'ordre suivant, en commençant par la plus déviée : *violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé, rouge* (1).

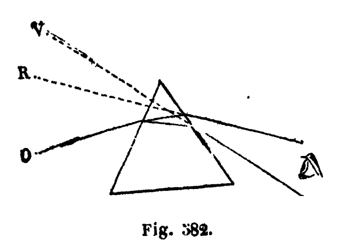


Fig. 582.

Spectre virtuel. — Quand on regarde à travers un prisme l'ouverture éclairée O, en plaçant l'œil sur le trajet des rayons dispersés, on voit une image de chacune des couleurs. Si l'arête du prisme est horizontale, le spectre *virtuel* RV est allongé dans le sens vertical; le violet est la couleur la plus déviée (fig. 582).

503. Les couleurs du spectre sont inégalement réfrangibles. — La lumière blanche est une *superposition de rayons diversement colorés, inégalement réfractés* par un même milieu transparent. Pour le démontrer, on fait tomber sur un prisme P à arête horizontale un faisceau SI de rayons solaires parallèles; on obtient

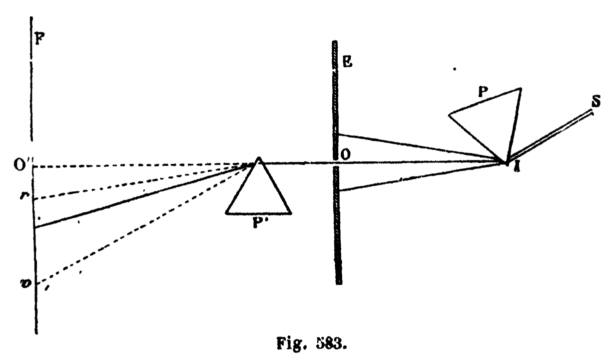


Fig. 583.

(1) Si la lumière solaire était composée de sept couleurs seulement, on obtiendrait sept taches lumineuses circulaires, de même diamètre. Ces cercles se recouvriraient en partie et l'ensemble serait une image allongée, sinueuse sur les bords latéraux. Or, chacune des régions colorées renferme elle-même une *infinité de rayons inégalement réfrangibles se succédant sans discontinuité;* l'image du spectre est constituée par une infinité de cercles limités latéralement par les deux lignes droites parallèles que forment les tangentes communes à ces cercles. A ses deux extrémités, l'image est terminée par deux demi-cercles qui sont les bords des images circulaires extrêmes.

un spectre qui s'étale verticalement sur un écran E ; une portion d'une couleur de ce spectre reçue sur une ouverture étroite percée en O va former sur un deuxième écran une image colorée O'.

En arrêtant les rayons qui passent en O par un second prisme P', à arête horizontale, une nouvelle déviation a lieu. Si l'on fait tourner le prisme P autour de son arête, de manière à recevoir successivement sur l'ouverture O les diverses couleurs du spectre, ces couleurs arrivent sur le prisme P' sous la même incidence (fig. 583). L'image reçue sur le deuxième écran, après la traversée du prisme P', *conserve la couleur* de la partie du spectre qui est tombée sur l'ouverture O ou n'est plus décomposable en couleurs différentes. On dit, d'après cela, que chaque couleur du spectre est **simple**.

La déviation produite par le prisme P', *va en croissant* (de *r* en *v*) lorsque la couleur qui tombe en O passe du rouge au violet; donc, pour une même substance transparente, des rayons de différentes couleurs subissent des *déviations inégales*.

Un milieu transparent présente pour chaque couleur, un *indice de réfraction* qui croît, comme la déviation, du rouge au violet.

504. Décomposition de la lumière par une lentille convergente. — Une lentille convergente, LL', ne concentre, *en un point unique*, les rayons lumineux issus d'un point, que si les rayons incidents sont de même couleur. La lentille se comportant comme une série de prismes qui ont leurs bases sur l'axe, chaque rayon est dévié vers l'axe, et le violet plus que le rouge; le foyer violet est donc plus rapproché de la lentille que le foyer rouge (1). Si la lentille L reçoit un faisceau de lumière blanche, parallèle à l'axe, on peut suivre le *croisement des faisceaux réfractés de diverses couleurs* (fig. 584).

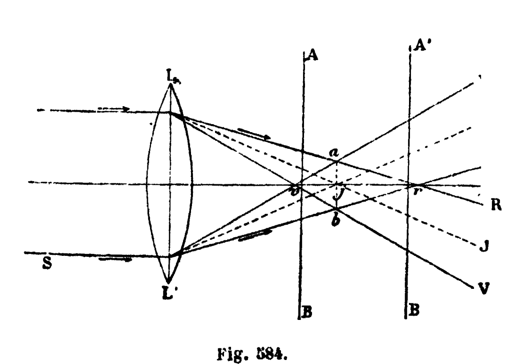


Fig. 584.

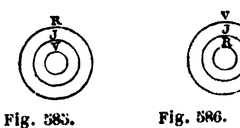
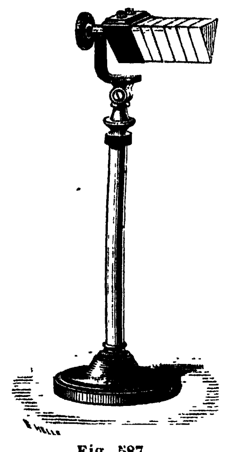


Fig. 585. Fig. 586.

(1) La distance focale d'une lentille est exprimée par $\frac{1}{f} = (m - 1)\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}\right)$; or, l'indice croît du rouge au violet, on a donc $m_v > m_r$; d'où $\frac{1}{f_v} > \frac{1}{f_r}$ et $f_v < f_r$.

En coupant les faisceaux, par un écran AB, avant leur partie commune la plus étroite *ab*, on obtient un cercle violet au centre, et rouge à l'extérieur (fig. 585); un écran A′B′ placé au delà de *ab* donne un cercle rouge au centre, violet à l'extérieur (1) (fig. 586).

505. Influence de la nature et de l'angle du prisme sur la dispersion. — Avec des prismes de différentes substances : verre, sel gemme, quartz, ou avec des prismes de verre creux renfermant des liquides variés : eau, alcool, éther, sulfure de carbone..., les spectres obtenus sur l'écran offrent toujours les mêmes couleurs, et dans le même ordre. A l'aide d'un *polyprisme* à arête horizontale (fig. 587) sur lequel on reçoit un faisceau qui sort d'une fente linéaire horizontale, on reconnaît que pour diverses substances et un même angle réfringent, les spectres n'offrent pas la même déviation et la même longueur. Pour des prismes de même substance, le spectre s'allonge quand on augmente l'angle du prisme.


Fig. 587.

RECOMPOSITION DE LA LUMIÈRE BLANCHE

Synthèse de la lumière blanche. — On reproduit de la lumière blanche soit en ramenant au parallélisme et en superposant les rayons dispersés qui forment le spectre solaire, soit en les concentrant en un même point. La superposition des impressions dues à toutes ces couleurs donne lieu à la sensation unique du blanc.

506. Recomposition par un prisme. — Un faisceau de lumière solaire dispersé par un prisme P est reçu sur un deuxième prisme P′, de même substance, et de même an-

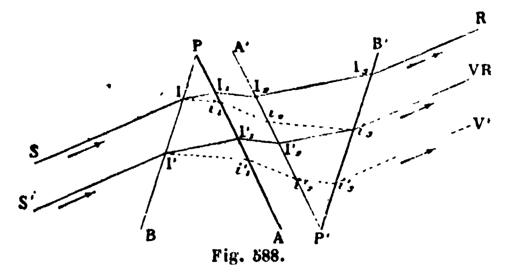


Fig. 588.

(1) Même dans la partie étroite *ab*, l'image est irisée; le point *j* est le seul point de la section qui reçoive de la lumière jaune; la surface qui reçoit de l'orangé est l'intersection par l'écran d'un cône ayant son sommet entre *j* et *r*; la *partie centrale* de la section *ab* est donc seule blanche, et les couleurs disparaissent du centre au bord.

gle, mais disposé en sens inverse (fig. 588). Le faisceau qui sort du deuxième prisme donne sur un écran une image blanche, sauf aux bords supérieur et inférieur qui sont irisés (1). Les apparences sont les mêmes qu'à travers une lame à faces planes et parallèles.

507. Recomposition par une lentille convergente ou par un miroir concave. — Si l'on reçoit sur une lentille con-

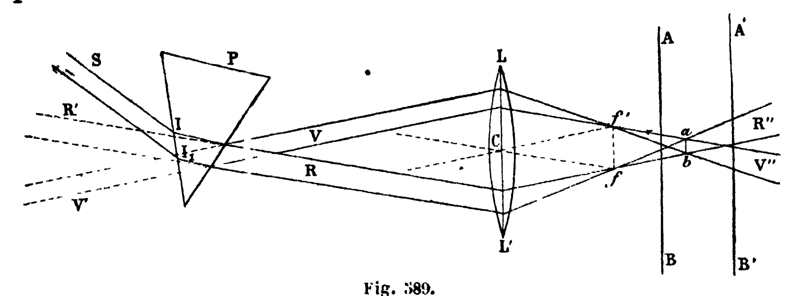


Fig. 589.

vergente L (fig. 589) les rayons colorés dispersés par un prisme, ces rayons sont rendus convergents, et un écran placé à une certaine distance de la lentille présente une surface blanche dans une région où les diverses couleurs sont concentrées.

Un faisceau blanc SI, de *rayons parallèles,* tombe sur un prisme P. Le faisceau coloré qui sort du prisme rencontre une lentille convergente L placée à une distance du prisme supérieure à la distance focale principale. Les rayons réfractés par le prisme et reçus par la lentille émanent d'un spectre virtuel V′R′; les rayons rouges sont concentrés, dans le plan focal principal, en un point *f* de l'axe secondaire C*f* parallèle à la direction des rayons rouges; les rayons violets se réunissent en un point *f*′ du plan focal sur l'axe secondaire C*f*′ des rayons violets.

Le cône des rayons rouges se prolonge au delà de *f*, le cône des rayons violets se prolonge au delà de *f*′. La partie commune *ab* des deux cônes prolongés appartient aussi aux faisceaux des couleurs intermédiaires. Une tache blanche se forme sur un écran placé en *ab* (2).

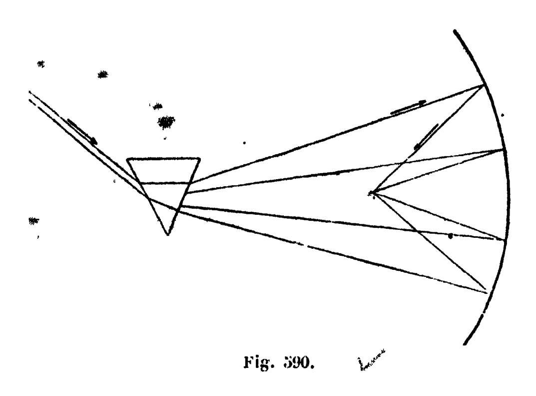
---

(1) Soit un rayon incident SI et $II_1I_2I_3R$ le rayon rouge qui en provient. Les faces PA et P′A′ étant parallèles, les angles en I_1 et I_2 sont égaux et les trajets II_1 et I_2I_3 sont parallèles. A cause du parallélisme des faces PB et P′B′ et des trajets II_1 et I_2I_3, les rayons extérieurs SI et I_3R sont parallèles. Pour le rayon violet $Ii_1\ i_2\ i_3$ V provenant de SI, le rayon émergent i_3 V est également parallèle à SI; les rayons émergents de diverses couleurs sont donc parallèles entre eux.

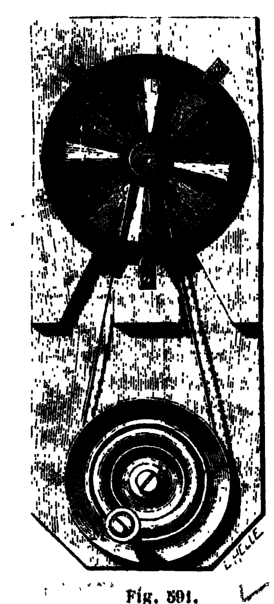
Menons vers le premier prisme, à partir de i_3, une parallèle $i_3I'_2$ à I_3I_2, puis en I'_2 une parallèle à I_2I_1, en I'_1, une parallèle à I_1I : le trajet suivi par un rayon rouge provenant d'un rayon incident S′I′ sera $I'I'_1I'_2i_3$, et ce rayon rouge i_3R' sortira superposé au rayon violet i_3V. On trouve de même superposés au rayon i_3V des rayons orangé, jaune, vert, bleu, provenant de rayons compris dans le faisceau incident entre SI et S′I′, ce qui donne du blanc suivant i_3V. Les rayons extrêmes restant seuls isolés, le bord supérieur du faisceau réfracté est rouge orangé et le bord inférieur bleu violet.

(2) *ab* est conjugué de la face d'entrée II_1 du prisme, où toutes les couleurs sont

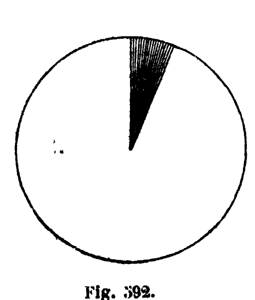
La lentille convergente peut être remplacée par un *miroir concave* (fig. 590). La distance focale d'un miroir ne dépendant pas de la couleur, la superposition est plus parfaite (1).


Fig. 590.

508. Recomposition physiologique — Des secteurs, colorés avec sept couleurs, aussi semblables que possible aux couleurs du spectre, sont distribués sur un disque D; l'étendue relative des différents secteurs a été prise à peu près égale à celle des couleurs correspondantes (fig. 591). Lorsque ce disque éclairé par de la lumière blanche, tourne rapidement autour d'un axe perpendiculaire à son plan et passant par son centre, il paraît entièrement blanc. Cette apparence s'explique par la **persistance des impressions lumineuses** (**537**).


Fig. 591.

Un écran circulaire, sur lequel un secteur a été couvert de papier rouge (fig. 592), étant mis en rotation *lente*, on voit le secteur rouge occuper *successivement* ses diverses positions. Si la rotation devient assez rapide pour qu'un tour dure moins de $0^{sec},1$ le secteur est vu à la fois dans toutes ses positions; l'écran paraît entièrement rouge.


Fig. 592.

réunies. Sur un écran AB, en avant de *ab*, conjugué d'un plan R'V' situé au delà de II_1, se forme un spectre qui a le violet en haut et le rouge en bas. Sur un écran A'B', au delà de *ab*, conjugué d'un plan VR compris entre le prisme et la lentille, on voit un spectre qui a le rouge en haut et le violet en bas.

(1) Nous avons supposé que le faisceau dispersé par le prisme était reçu sur une lentille *achromatique* n'ayant qu'un plan focal pour toutes les couleurs.

Chacun des secteurs colorés du disque produit, sur l'œil, l'effet d'un disque entier de la couleur du secteur et la superposition des impressions donne la sensation du blanc.

CLASSIFICATION DES COULEURS

509. Couleurs simples. — Une couleur est dite *simple* quand son passage à travers un prisme ne la modifie pas.

Couleurs composées. — Une couleur que le prisme décompose en plusieurs couleurs simples est dite *composée*. Les corps de la nature ont rarement des couleurs simples. Notre œil, moins délicat que notre oreille, ne distingue pas une couleur simple d'une couleur composée. L'analyse *se fait au moyen d'un prisme.*

Couleurs complémentaires. — Deux couleurs dont la superposition donne du blanc sont dites *complémentaires*. Si, dans la recomposition de la lumière par un miroir concave, on supprime plusieurs couleurs du spectre, les couleurs conservées donnent par leur réunion une teinte colorée, *composée*. La réunion des couleurs supprimées offre une autre teinte composée. Ces deux teintes composées, mélangées, donnent du blanc puisqu'elles contiennent tous les éléments du spectre. On peut aussi produire la sensation du blanc par le mélange de deux couleurs simples du spectre, convenablement choisies : par exemple, le vert et le rouge.

510. Couleurs des corps. — **Coloration par transparence.** — La couleur d'un corps transparent résulte de l'absorption qu'il exerce. Il est *incolore* s'il transmet également toutes les couleurs. Il est *coloré* s'il laisse passer certains rayons et en absorbe d'autres. Il est opaque s'il ne laisse passer aucune couleur. Un verre bleu ou vert paraît noir s'il est regardé à travers un verre rouge.

Coloration par diffusion. — Un corps n'est visible que par la lumière qu'il diffuse ; il n'a pas de couleur propre.

Cas de la lumière blanche : un corps paraît *blanc* s'il diffuse également tous les rayons ; il est invisible, s'il les absorbe tous ; s'il renvoie certains rayons et en absorbe d'autres, il paraît *coloré* de la teinte du mélange des rayons diffusés.

Cas d'une lumière colorée : un corps paraît coloré par les couleurs qu'il diffuse. Dans la lumière rouge, une étoffe rouge est rouge ; une étoffe verte y paraît noire, car elle absorbe le rouge. Comme les lumières artificielles présentent, soit un excès de rouge sur la

lumière blanche (lampes à huile et à gaz), soit un excès de bleu (arc électrique), les étoffes colorées n'offrent pas les mêmes nuances aux lumières artificielles et à la lumière du jour.

SPECTRES DES SOURCES LUMINEUSES

511. Production d'un spectre pur. — On a d'abord formé un spectre, en plaçant dans une chambre noire un prisme très près d'une petite ouverture circulaire qui recevait les rayons solaires; on éloignait l'écran à plusieurs mètres. L'ouverture circulaire a été remplacée par une fente rectangulaire étroite S, *parallèle à l'arête réfringente* du prisme. Mais, le faisceau incident étant *divergent*, il en était de même des divers faisceaux colorés réfractés et les taches lumineuses données sur l'écran par les divers rayons dispersés empiétaient les unes sur les autres; les couleurs sont ainsi imparfaitement séparées.

Spectre pur — On obtient un spectre *pur*, c'est-à-dire où les couleurs sont le mieux séparées, par la disposition suivante (fig. 593).

Les rayons, admis dans une chambre noire par une fente rectangulaire *très étroite* S, sont reçus sur une *lentille convergente* L placée à une distance de la fente supérieure à sa distance focale principale.

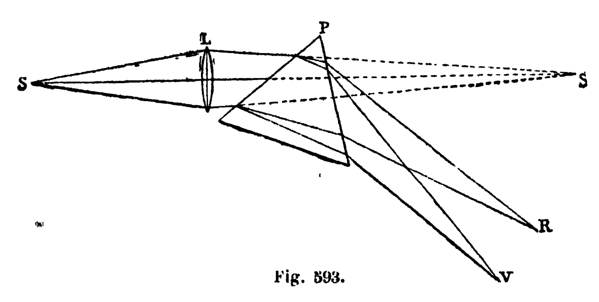
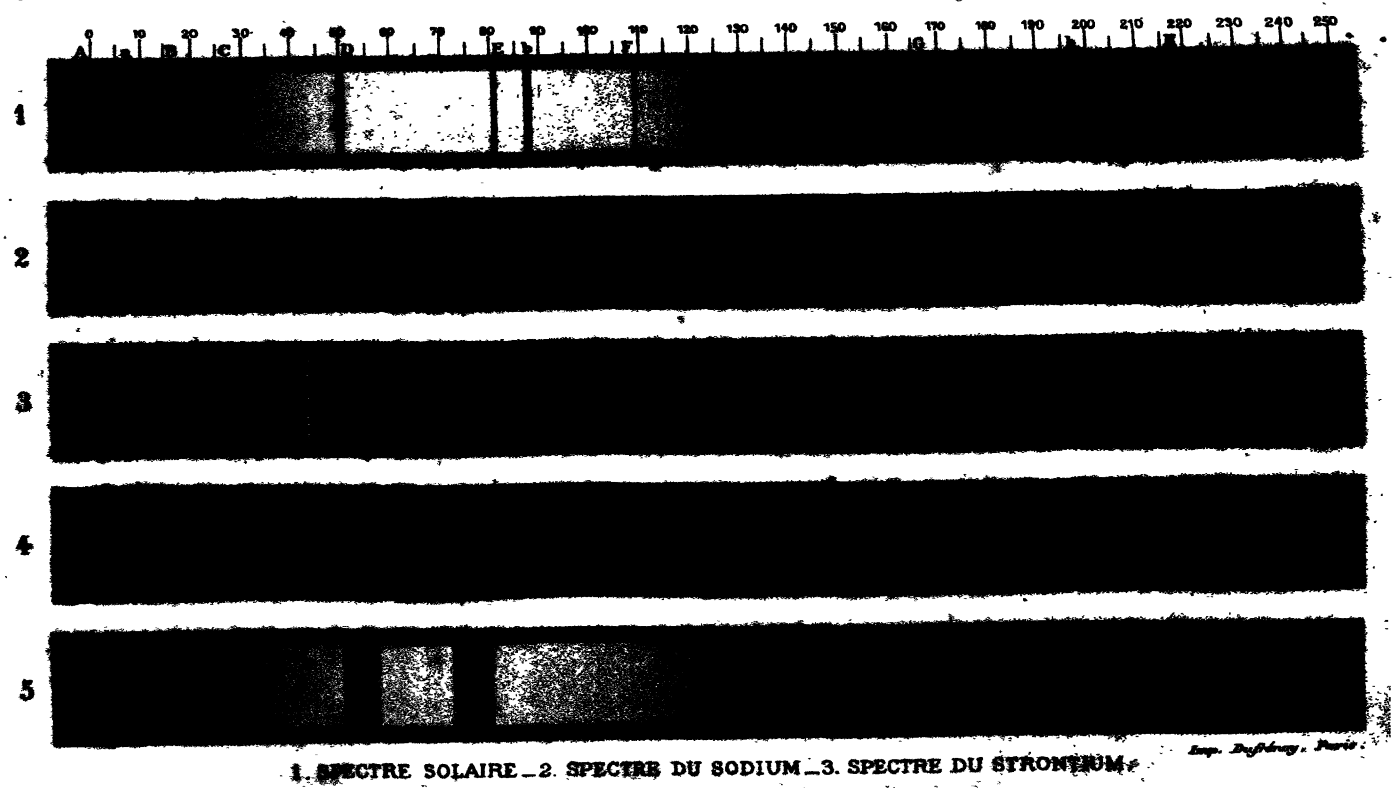


Fig. 593.

Une image réelle S′ se formerait sur un écran disposé dans le plan conjugué de la fente par rapport à la lentille. Un peu au delà de la lentille, on dispose un prisme P, ayant son arête réfringente parallèle à la fente et orienté **dans la position du minimum de déviation** pour les rayons jaunes. Au sortir du prisme, chacune des couleurs du spectre donne une image conjuguée de la fente. Ces images empiètent d'autant moins les unes sur les autres que la fente est plus fine; elles forment un spectre RV étalé perpendiculairement à la fente. Si la lentille est distante de $2f$ de la fente, la distance de



1. SPECTRE SOLAIRE — 2. SPECTRE DU SODIUM — 3. SPECTRE DU STRONTIUM.
4. SPECTRE DE L'HYDROGÈNE — 5. SPECTRE DU SANG (Absorption).

la lentille à l'écran est également $2f$, et les diverses images colorées de la fente ont la même largeur que la fente.

Au lieu de recevoir le spectre sur un écran, on peut examiner avec une loupe son image aérienne.

Le prisme peut aussi être placé en avant de la lentille (fig. 594).

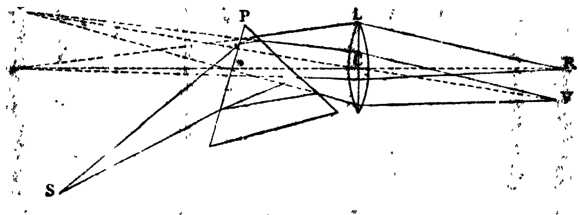


Fig. 594.

Les rayons d'une couleur divergent d'un point du spectre virtuel *vr* de la fente. Ces rayons sont rendus convergents par la lentille L qui donne en R une image réelle rouge de *r*, en V une image réelle violette de *v*. Ces images s'obtiennent en joignant *v* et *r* au centre optique C.

512. Raies du spectre solaire. — Le spectre solaire *n'est pas continu*. Il présente des intervalles *noirs*, étroits et nombreux, irrégulièrement distribués, parallèles à la fente et à l'arête réfringente du prisme, appelés *raies de Fraunhofer*.

Fraunhofer a distingué 10 *groupes* principaux de raies : A, B, C, D, E, F, G, H et *a*, *b* ; A et *a*, B et C sont dans le rouge, D entre l'orangé et le jaune, E entre le jaune et le vert, *b* et F dans le vert, G entre le bleu et l'indigo, H à l'extrême violet. On compte plus de vingt mille raies très fines.

Pour une même substance réfringente, chacune des raies occupe toujours la même position dans le spectre solaire et correspond toujours au même indice de réfraction.

513. Propriétés du spectre solaire. — L'intensité *lumineuse* des diverses parties du spectre est variable ; c'est vers le milieu du jaune, entre les raies D et E, que se trouve le maximum d'éclat.

Les effets lumineux du spectre solaire sont accompagnés d'effets *calorifiques*. En promenant, le long du spectre, une pile thermo-électrique étroite, on observe, dans le spectre visible, une élévation de température qui croît du violet au rouge (336). L'effet calorifique est prolongé dans la partie **infra-rouge** du spectre par des *rayons invisibles* moins réfrangibles que le rouge. On a constaté aussi dans cette région l'existence de nombreuses raies, inactives.

Les rayons solaires exercent des actions *chimiques* sur de nom-

breuses substances : ils combinent le chlore à l'hydrogène, transforment le phosphore blanc en phosphore rouge, décomposent les sels d'argent. Sous leur influence, le *chlorure d'argent* change sa couleur blanche contre une couleur ardoisée par la production d'argent très divisé. Une feuille de papier couverte d'une mince couche de chlorure d'argent noircit dans un spectre depuis la région jaune jusqu'à la région violette; les rayons rouges et infra-rouges sont sans action sensible. La décomposition se poursuit, au delà du violet, dans une *partie invisible* du spectre, dite **ultra-violette**. Les raies du spectre visible et du spectre ultra-violet se dessinent en blanc sur un fond noir altéré par les rayons actifs (1).

Pour l'étude du spectre infra-rouge, on emploie une lentille et un prisme de sel gemme; pour le spectre ultra-violet, une lentille et un prisme de quartz.

Les radiations ultra-violettes produisent des réactions chimiques, impressionnent des plaques photographiques, excitent la fluorescence, déchargent les corps électrisés.

Propriétés physiologiques de la lumière. — La lumière *active les combustions respiratoires* des animaux; la privation de lumière ralentit la nutrition, provoque l'obésité, etc.

L'action *microbicide* des rayons très réfrangibles est utilisée dans la photothérapie et dans la stérilisation de l'eau.

La *respiration des végétaux* varie avec la lumière; il y a absorption d'oxygène et dégagement d'anhydride carbonique le jour et la nuit; la fonction *chlorophyllienne*, qui a pour effet de décomposer l'anhydride carbonique avec dégagement d'oxygène et fiaxtion de carbone, ne s'accomplit qu'à la lumière.

514. Spectres des sources artificielles. — Les spectres de certaines sources artificielles s'étendent beaucoup plus loin que le spectre solaire dans l'infra-rouge et l'ultra-violet (**557**).

515. Inséparabilité des effets d'une radiation. — Bien que les rayons peu réfrangibles soient plus aptes à produire des effets calorifiques et les rayons plus réfrangibles à exercer des actions chimiques, il n'y a pas lieu de distinguer trois espèces de rayons : calorifiques, lumineux, chimiques.

Un rayon, de réfrangibilité déterminée, appelé aussi **radiation**, *produit différents effets suivant l'organe ou le corps qui le reçoit :*

---

(1) Comme ce sont principalement les rayons très réfrangibles qui produisent les actions chimiques, on renferme, pour les conserver purs, un grand nombre de corps dans des flacons noirs ou jaunes, le verre jaune arrêtant les rayons très réfrangibles.

sensation lumineuse sur la rétine, impression calorifique sur un thermomètre ou sur la peau, action chimique sur le chlorure d'argent, etc. Les effets d'une radiation sont inséparables ; toute diminution de l'un est accompagnée d'une diminution *proportionnelle* des deux autres. On l'observe pour des rayons moyens (entre E et H) qui produisent à la fois les trois effets. Si la moitié de la lumière disparaît, la moitié de la chaleur disparaît aussi.

Toutes les radiations, quelle que soit leur position dans le spectre, produisent les phénomènes d'interférence et de polarisation.

516. Spectroscopes. — Un spectroscope est un appareil qui permet d'observer les spectres des sources lumineuses. Il comprend un *collimateur*, un *prisme* et une *lunette* (fig. 596).

Le **collimateur** L est un tube qui porte, à une extrémité, une *fente* qu'on éclaire avec la source G dont on veut observer le spectre. La fente est placée au *foyer principal* d'une lentille convergente, montée à l'autre extrémité du tube. Les rayons qui ont traversé le collimateur sortent de sa lentille parallèlement à son axe principal et tombent sur un **prisme**, dont les arêtes sont parallèles aux bords de la fente. Le prisme est disposé au centre d'un *cercle* et orienté *au minimum de déviation* pour les rayons du jaune moyen.

Les rayons réfractés par le prisme tombent sur l'objectif d'une **lunette astronomique** L'. A chacune des radiations correspond un faisceau de rayons parallèles.

L'objectif de la lunette fournit, dans son plan focal, un spectre réel de la fente éclairée. On observe l'image aérienne du spectre avec l'oculaire *o* de la lunette qui en donne une image virtuelle.

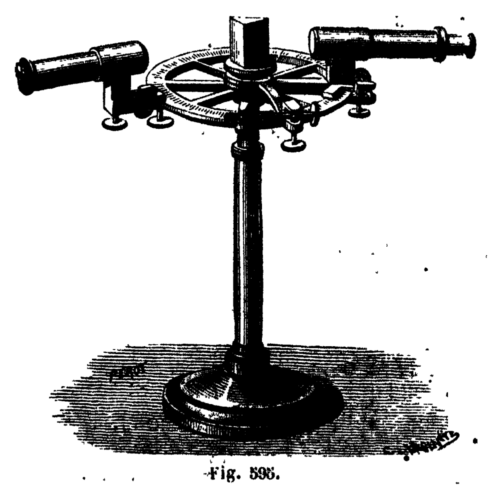


Fig. 595.

Dans le **goniomètre de Babinet** (fig. 595) qui permet de mesurer les indices de réfraction des diverses radiations, le collimateur L et la lunette L' ont leurs axes dirigés *suivant deux rayons d'un cercle divisé* horizontal A qui est supporté par un pied vertical. La lunette et la plate-forme sur laquelle le

prisme est appliqué sont mobiles autour d'un axe vertical qui passe par le centre du cercle divisé. En faisant tourner la lunette, on amène le point de croisement des fils de son réticule, successivement, sur les différentes raies du spectre et on lit pour chacune la position de la lunette sur le cercle. On obtient ainsi l'*angle de déviation* minimum pour chaque raie.

Dans les **spectroscopes usuels**, on ne mesure pas les déviations ; les différentes régions du spectre sont repérées par rapport aux divisions d'un **micromètre** transparent, sur lequel sont tracés des

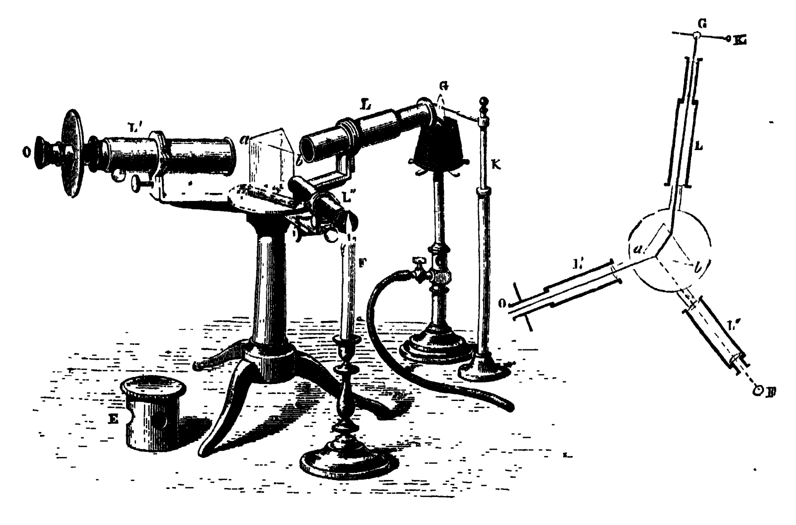


Fig. 596. Fig. 597.

traits fins parallèles à la fente ; le micromètre, éclairé par une bougie F, est placé en L″ au foyer d'un collimateur.

Le faisceau de rayons parallèles qui sort de ce second collimateur se réfléchit en partie sur une face *ab* du prisme et tombe sur l'objectif de la lunette dans la même direction que les rayons réfractés provenant de la source (fig. 597). L'observateur voit à la fois, *l'un au-dessus de l'autre,* dans le plan focal de la lunette, le micromètre divisé et le spectre de la fente éclairée par la source G. On note les divisions qui correspondent aux raies du spectre.

Pour établir des comparaisons, il est commode d'observer simultanément les spectres de deux lumières. Les rayons de l'une, G, pénètrent directement par la moitié inférieure de la fente du collimateur (fig. 598), l'autre lumière H éclaire latéralement un petit prisme à réflexion totale *i,* appliqué sur la moitié supérieure de

la fente. Les régions de même réfrangibilité des deux spectres sont vues superposées dans le plan focal de la lunette.

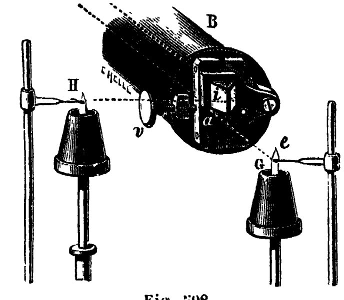


Fig. 598.

Les spectroscopes précédents ont l'inconvénient de placer la lunette dans une position oblique par rapport au collimateur et à la source lumineuse. On emploie souvent des **spectroscopes à vision directe**, où la déviation est annulée pour le jaune moyen, en même temps qu'une dispersion persiste pour les diverses couleurs.

517. Différents types de spectres. — On distingue trois types principaux de spectres :

1° **Spectres continus sans raies.** — Ce sont les spectres des *solides* et des *liquides incandescents*. Les charbons de l'arc voltaïque, les filaments des lampes à incandescence ont des spectres continus. La flamme d'un bec de gaz, de l'huile, d'une bougie, donne un spectre continu, dû au *charbon incandescent* en suspension dans la flamme.

2° **Spectres discontinus.** — Les flammes qui ne contiennent pas de particules solides, offrent un spectre discontinu, formé de raies lumineuses, séparées par des intervalles obscurs. Tels sont les spectres de *gaz raréfiés*, traversés par des étincelles électriques, et les spectres des vapeurs métalliques. Les parties infra-rouge et ultra-violette sont discontinues comme la partie lumineuse.

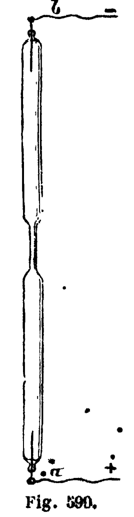


Fig. 599.

Gaz raréfiés. — On enferme un gaz, sous une pression de quelques millimètres, dans un tube capillaire terminé par deux renflements où pénètrent des fils de platine soudés (fig. 599). Placée devant la fente d'un spectroscope, parallèlement à cette fente, la partie capillaire s'illumine quand on fait jaillir dans le tube, par les fils *a* et *b*, les décharges d'une bobine d'induction ; avec l'hydrogène, on a trois raies seulement (rouge, verte, violette).

Vapeurs métalliques. — En éclairant la fente d'un spectroscope avec la flamme très chaude et peu visible d'un bec Bunsen, on n'obtient pas de spectre. Si l'on introduit dans la flamme une boucle de fil de platine trempée dans la dissolution d'un sel métallique volatil, le sel se décompose en partie et donne des vapeurs (1). Le spectre

(1) On choisit les sels les plus facilement décomposables : par ex. les chlorures.

de ces vapeurs est *discontinu* et formé de raies brillantes qui sont identiques pour les divers sels d'un même métal et *caractérisent l'élément métallique*. On fixe leur position par le micromètre (1).

Dans la partie lumineuse du spectre, les sels de *sodium* ne présentent qu'une double raie dans le jaune-orangé, les sels de *thallium* une raie verte, les sels de *lithium* une raie rouge et une raie jaune, les sels de *strontium* plusieurs raies rouges, une raie bleue, etc.

Les spectres discontinus d'émission ne se présentent pas d'ordinaire avec la simplicité de la description précédente, ils contiennent le plus souvent à la fois des *bandes* et des *raies*, qui peuvent se détacher sur un fond continu provenant de particules incandescentes.

Les **bandes** se divisent en deux catégories : 1° **bandes diffuses**, non résolubles en raies et se dégradant insensiblement à droite et à gauche; elles sont généralement dues à des molécules d'oxydes ou de sels que la température de la source a été insuffisante à dissocier; 2° **bandes cannelées** à bord nettement tranché d'un côté et diminuant progressivement d'intensité de l'autre côté.

Les **raies** sont dues aux éléments *dissociés* comme l'a fait voir M. de Gramont; on n'observe plus de bandes entre deux électrodes minérales, au passage d'*étincelles de décharge d'un condensateur* de capacité suffisante; on n'a plus alors que des spectres à raies qui sont superposés, chacun des éléments, métal ou métalloïde, donnant un spectre individuel de dissociation, avec ses raies caractéristiques. L'emploi des étincelles condensées permet d'étudier les spectres de dissociation des éléments.

Les spectres de flammes, les spectres d'arc électrique, les spectres des liquides par étincelles électriques d'une bobine, sans condensateur dans le secondaire, donnent des bandes et des raies; les bandes diminuent quand la température s'élève, les raies augmentent de nombre dans l'arc électrique et plus encore dans l'étincelle.

3° **Spectres continus sillonnés de raies noires.** — Le spectre solaire est caractérisé par des raies noires *très fines* et très nombreuses. La lumière de la Lune et la lumière des planètes, n'étant que de la lumière solaire réfléchie, donnent le spectre solaire avec ses raies. Les étoiles proprement dites présentent des spectres continus, sillonnés de raies obscures, analogues aux raies solaires, mais de positions différentes.

Le spectre des nébuleuses non résolubles est formé de raies brillantes; ces nébuleuses doivent consister en gaz incandescents.

---

(1) Le nombre des raies observées augmente avec la température de la flamme.

Souvent la solution saline est renfermée dans un petit tube ouvert par le haut, traversé à sa partie inférieure par un fil de platine qui est relié à l'un des pôles d'une bobine de Ruhmkorf. On fait éclater des étincelles entre la surface du liquide et un second fil de platine voisin de la surface et relié au second pôle de la bobine; le spectre de l'étincelle est riche en raies.

518. Analyse spectrale. — Un mélange de sels de plusieurs métaux fournit un spectre qui contient toutes les raies de ces métaux observés séparément. La présence, dans la flamme, d'une très petite quantité d'un sel métallique donné suffit pour faire apparaître, dans le spectre, les raies caractéristiques de cet élément métallique. De là une méthode d'analyse extrêmement sensible, appelée *analyse spectrale.* L'apparition de raies jusque-là inconnues a fait découvrir des métaux nouveaux : le *rubidium*, le *cœsium,* le *thallium,* l'*indium*, le *gallium,* ont été isolés, après avoir été révélés par le spectroscope. Le *radium* a un spectre spécial; les nouveaux gaz, *argon*, *néon, hélium*, rendus incandescents, ont aussi des spectres caractéristiques.

SPECTRES D'ABSORPTION

519. Absorption des radiations lumineuses. — *Mode d'observation.* — On interpose une substance transparente entre un spectroscope et une source à spectre continu (flamme d'un bec de gaz ou charbon positif de l'arc voltaïque); le spectre transmis fait connaître les radiations absorbées.

Substance incolore. — Les substances transparentes *incolores* laissent passer en égale proportion toutes les couleurs du spectre.

Substances colorées. — Un corps transparent coloré est dit *monochromatique* s'il ne laisse passer qu'une région peu étendue du spectre. Les corps transparents monochromatiques sont rares. Un *verre rouge* coloré par l'*oxyde de cuivre* ne présente au spectroscope qu'une bande rouge; avec une solution de *bichromate de potasse* il ne passe que de l'orangé; avec des solutions de sels de *nickel* il ne passe que du vert. La plupart des corps colorés donnent des bandes lumineuses en diverses régions du spectre; la coloration est celle du mélange des couleurs qui passent.

Comme l'absorption n'augmente pas d'ordinaire avec l'épaisseur dans la même proportion dans les diverses régions, la teinte de la lumière transmise *varie avec l'épaisseur*. Cela se présente même avec les substances incolores ; ainsi l'eau, incolore sous de petites épaisseurs, paraît bleue ou verte sous des épaisseurs suffisantes.

Certains spectres d'absorption sont *sillonnés de bandes noires très nombreuses :* c'est le cas du peroxyde d'azote, de la vapeur d'iode, de la vapeur d'eau; les bandes augmentent en nombre et en largeur avec l'épaisseur traversée.

Certaines bandes d'absorption ont une apparence caractéristique précieuse pour l'analyse : citons les deux bandes noires d'une solution étendue de *sang* (entre les raies D et E du spectre solaire).

520. Absorption des radiations infra-rouges et ultra-violettes. — On explore le spectre calorifique avec une pile thermo-électrique, et le spectre ultra-violet avec un papier photographique. Certaines substances incolores exercent une forte absorption sur les rayons invisibles : le *verre*, l'*eau*, l'*alun* arrêtent en grande partie les premières radiations infra-rouges et laissent passer plus facilement les premières radiations ultra-violettes. Le *sel gemme* laisse passer à peu près toutes les radiations : infra-rouges, lumineuses, ultra-violettes. Le *quartz*, le spath fluor, se laissent facilement traverser par les rayons ultra-violets.

521. Absorption par les vapeurs métalliques. — Placée sur le trajet d'une source lumineuse, une vapeur métallique absorbe spécialement les *rayons qu'elle a la propriété d'émettre;* elle est

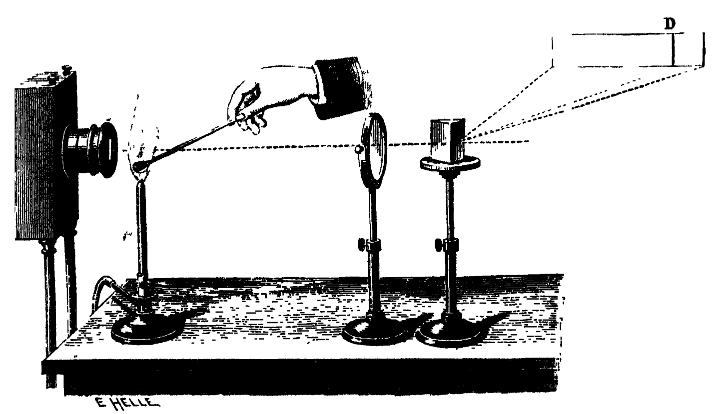


Fig. 600.

transparente pour les autres. Pour démontrer cette relation entre l'absorption et l'émission, on forme sur un écran (fig. 600), le spectre continu S d'une fente F éclairée par la lumière Drummond (magnésie rendue incandescente par la combustion du gaz d'éclairage dans l'oxygène). Si, dans la flamme d'un bec Bunsen *b*, disposée un peu en avant de la fente F, on brûle un fragment de sodium [1] : la raie D apparaît en noir dans le spectre S primitivement continu [2].

(1) Si la flamme chargée de vapeur de sodium était seule devant la fente, son spectre ne présenterait que la raie jaune D, caractéristique du sodium.

(2) La source lumineuse qui donne le spectre continu doit avoir une intensité plus forte que la vapeur absorbante, afin que le spectre dû à la vapeur absorbante soit plus sombre que le spectre continu.

Parmi toutes les radiations émises par la magnésie incandescente, la vapeur de sodium a donc arrêté précisément les radiations qu'elle émet elle-même. Cette expérience réalise ce que l'on appelle le **renversement** de la raie du sodium.

522. Origine des raies du spectre solaire. — Le globe solaire est une masse incandescente à spectre continu, entourée d'une atmosphère de vapeurs ou *chromosphère* dont la température est *moins élevée* que celle du noyau.

La chromosphère, observée *isolément* (par exemple dans les éclipses totales de soleil, alors qu'elle déborde le noyau brillant *caché* par le disque lunaire), donne un spectre de raies brillantes qui sont dues aux vapeurs qu'elle renferme. En temps ordinaire, les vapeurs de la chromosphère, placées devant le noyau incandescent, absorbent les radiations qu'elles émettent elles-mêmes.

Si l'on reçoit à la fois dans un spectroscope (à l'aide du prisme latéral à réflexion totale) le spectre d'une flamme chargée de sodium et le spectre solaire, on reconnaît que la double raie sombre D du spectre solaire est le *prolongement rigoureux* de la double raie brillante du sodium. La vapeur de sodium existe en effet dans la chromosphère. L'*hydrogène*, l'*hélium*, le *baryum*, le *fer*, le *magnésium*, le *zinc*, le *nickel*, etc., s'y trouvent de même à l'état gazeux. L'absence de concordance entre des raies noires du spectre et les raies brillantes du *lithium*, du *strontium*, de l'*aluminium*, de l'*argent*, de l'*or*, etc., exclut ces métaux de l'atmosphère solaire.

Raies telluriques. — La lumière solaire éprouve encore des absorptions par l'atmosphère terrestre. Les raies noires dues à ces dernières absorptions sont dites *telluriques*; ainsi les raies A et B augmentent de largeur et d'intensité quand le Soleil est voisin de l'horizon et que ses rayons traversent une couche d'air plus épaisse (**597**). Un grand nombre de raies telluriques sont dues à l'oxygène et à la vapeur d'eau de notre atmosphère; ces raies coïncident avec les raies d'absorption que produit une colonne de vapeur d'eau dans le spectre continu d'une source artificielle.

INCANDESCENCE

Corps incandescents. — Les corps incandescents doivent leur pouvoir lumineux à leur échauffement; c'est le cas des métaux, du noir de fumée, d'un grand nombre d'oxydes.

Au point de vue de leur rayonnement, les corps incandescents forment deux groupes : les corps noirs, les corps colorés.

523. Corps noirs. — Par analogie avec le noir de fumée, dont le pouvoir émissif est maximum et dont le pouvoir absorbant est pour toutes les radiations, égal à l'unité (**376** et **377**), on donne le nom théorique de *corps parfaitement noir* à un corps qui émet et absorbe, à une température donnée, toutes les radiations qu'un corps échauffé peut émettre à cette température, sans discontinuité dans le spectre, et *avec une intensité maximum;* il n'en réfléchit et n'en diffuse aucune (1).

A mesure que la température *s'élève*, le spectre d'émission, d'abord infra rouge jusque vers 500°, s'étend graduellement, gagne le jaune, puis le vert, enfin atteint le violet et l'ultra-violet.

Pour chaque température, il y a un *maximum d'émission dans une région* spéciale du spectre, définie par sa position dans le spectre *normal* (**601**). Quand la température s'élève, *le maximum passe* de l'infra-rouge à la partie visible; il occupe le milieu du spectre lumineux vers 6000° (2).

Sans présenter le maximum de rayonnement d'un corps parfaitement noir, le filament de charbon d'une lampe à incandescence, le charbon positif d'une lampe à arc, les flammes où l'élément éclairant est du charbon incandescent en suspension, font partie des corps noirs, et n'offrent pas de lacunes dans leur spectre.

Rendement lumineux des corps noirs. — Pour les corps noirs incandescents, le rendement lumineux ou le quotient de l'énergie du rayonnement visible par l'énergie du rayonnement total, est très faible. Il n'est que 0,04 pour une lampe à gaz, 0,1 pour une lampe électrique à incandescence, 0,2 pour une lampe électrique à arc. Cette faiblesse tient à une énergie considérable qui est répartie dans un spectre infra-rouge très étendu et qui ne sert qu'à échauffer le milieu ambiant.

Avec de pareilles sources, il y a intérêt à élever le plus possible la température, pour que la région qui présente le maximum d'émission atteigne la partie lumineuse.

524. Corps colorés. — Il y a des corps incandescents dont

---

(1) Son rayonnement *total* est *proportionnel à la quatrième puissance* de sa température absolue.

(2) La *fréquence* des radiations du maximum d'émission d'un corps noir est *proportionnelle à sa température absolue.* A 1000° absolus, le maximum d'énergie dans un spectre normal de réseau se trouve à la fréquence de 102 trillions, à 2000° à la fréquence de 204 trillions.

le spectre d'émission présente des lacunes et, comme l'absorption accompagne l'émission, ces corps sont transparents pour les radiations qu'ils n'émettent pas et opaques pour les radiations qu'ils émettent. On les dit *colorés*.

Pour une radiation quelconque, *le pouvoir émissif d'un corps incandescent coloré reste inférieur au pouvoir émissif du corps noir*, qui a une émission maximum pour toutes les radiations; mais si, dans son *émission sélective*, le corps offre, dans le spectre visible, une émission voisine de celle du corps noir et, dans l'infra-rouge, une émission très inférieure, son rendement lumineux pourra être supérieur à celui du corps noir. L'oxyde de magnésium présente, dans une certaine mesure, ces propriétés.

Le *manchon Auer*, formé de 99 % d'oxyde de thorium et de 1 % d'oxyde de cérium est spécialement avantageux. Vers 1700°, il rayonne environ deux fois moins de lumière qu'un corps noir, mais, à égalité de dépense de chaleur, il en rayonne incomparablement plus. En effet, si on le chauffe dans la flamme d'un bec Bunsen, son émission, réduite pour l'infra-rouge moyen, fait qu'il est porté à une température notablement plus élevée qu'un corps noir qui reste sombre parce qu'il a une émission calorifique très considérable. Pour rendre un corps noir aussi lumineux en le portant à une température qui se rapproche de celle qui est atteinte par le manchon Auer, il faudrait une très grande dépense de gaz et d'oxygène.

Le manchon Auer a l'inconvénient de rayonner encore l'infra-rouge extrême. Un *manchon idéal* n'émettrait que les vibrations visibles. Notre œil présentant un *maximum de sensibilité* très accusé *pour le jaune-vert*, le rendement éclairant serait maximum si l'émission de la substance se bornait à cette région.

LUMINESCENCE

Avec l'incandescence on n'obtient une quantité importante de rayons lumineux utiles que si le corps chauffé est porté à une température très élevée. Il en est autrement avec la **luminescence**.

525. Corps luminescents. — Les corps luminescents rayonnent de l'énergie lumineuse empruntée à d'autres sources d'énergie que l'énergie calorifique et ils émettent, à une basse température, des rayons lumineux que les corps chauffés n'émettraient qu'à une température très élevée. Sont luminescents les corps phosphores-

cents et fluorescents, les *tubes de Geissler* ou *tubes à gaz raréfiés* parcourus par une décharge électrique, les corps qui luisent dans l'obscurité quand on les broie (*craie*) ou quand ils cristallisent (*acide arsénieux*), les animaux qui émettent de la lumière (*ver luisant*).

Le rendement lumineux du ver luisant est égal à l'unité, car son rayonnement est localisé dans le spectre visible; son rendement éclairant est même égal à l'unité, puisque son rayonnement est concentré dans le vert pour lequel la sensibilité de l'œil est maximum.

Les phénomènes de luminescence ont commencé à recevoir une application industrielle avec la lampe à arc au mercure. La lampe *à arc au mercure* (**812**) émet trois radiations principales dans le spectre visible : jaune-orangé, vert, violet. A la température de l'arc au mercure, l'émission par un corps chauffé resterait limitée à l'infra-rouge.

Par une luminescence due à des courants électriques à haute fréquence, les tubes à gaz raréfiés, en particulier les tubes à néon, donnent une solution très avantageuse de l'éclairage.

La *phosphorescence* et la *fluorescence* sont les phénomènes de luminescence les mieux étudiés. Elles consistent en une émission de lumière provoquée chez certaines substances par l'action de radiations spéciales.

On constate la *phosphorescence* pour le diamant, certains sulfures, la platinocyanure de baryum, etc. Ces substances, transportées dans l'obscurité après avoir été exposées à la lumière, continuent à émettre de la lumière. L'émission *persiste* donc quelque temps *après la suppression* des radiations excitatrices.

Dans la *fluorescence*, l'émission de lumière *disparaît, à l'instant* même *où l'action* des radiations excitatrices *est suspendue*.

Les radiations qui excitent le mieux la phosphorescence et la fluorescence sont *très réfrangibles*. Les radiations *émises* par phosphorescence ou fluorescence, analysées au spectroscope, *sont moins réfrangibles que les radiations excitatrices* (1).

526. Phosphorescence. — La plupart des substances, sauf les métaux, sont légèrement phosphorescentes.

Radiations actives. — Dans une chambre obscure, on projette un spectre solaire sur un écran recouvert de *sulfure de calcium;* si après quelques instants, on intercepte les rayons, l'écran reste

---

(1) D'une façon analogue, un corps, échauffé par des rayons lumineux, absorbe une partie de ces rayons et émet ensuite de la chaleur obscure, moins réfrangible que les rayons excitateurs.

illuminé aux points qui ont été impressionnés par le bleu, le violet et l'ultra-violet (1). Les sources très riches en *rayons très réfrangibles* (soleil, arc électrique, tubes de Geissler, magnésium) sont beaucoup plus aptes à provoquer la phosphorescence que la lumière du gaz ou la lumière Drummond.

Radiations émises. — La couleur émise dépend de la nature et souvent du mode de préparation de la substance.

Action des rayons peu réfrangibles. — Les rayons peu réfrangibles ne provoquent pas la phosphorescence, mais ils *activent l'émission*. La chaleur agit de même. Quand un sulfure alcalino-terreux, conservé dans l'obscurité, a cessé d'être phosphorescent, il le redevient si on le chauffe (2). L'énergie emmagasinée s'était dépensée en partie dans une première phosphorescence; le résidu se dissipe lentement et sans phosphorescence appréciable; la chaleur rend l'émission apparente en l'accélérant.

Durée de la phosphorescence. — Après la suppression des rayons excitateurs, la phosphorescence persiste plusieurs heures pour certains sulfures alcalino-terreux; la durée se réduit à $0^{sec},002$ pour le platinocyanure de baryum. Un appareil, appelé *phosphoroscope*, mesure pour chaque substance la durée de la phosphorescence.

527. Fluorescence. — La fluorescence a une durée inappréciable au phosphoroscope, inférieure à $0^{sec},0001$. Parmi les substances fluorescentes on peut citer : le *spath fluor* qui a donné son nom au phénomène, les solutions alcooliques de *chlorophylle*, les solutions d'éosine et de fluorescéine, matières colorantes dérivées de la houille, les solutions de *sulfate* de *quinine* dans l'eau additionnée d'acide sulfurique, les verres colorés par des *sels d'urane*, etc.

Radiations actives. — Sur un papier blanc, on trace des caractères avec une solution incolore de sulfate de quinine, et on promène le papier dans les différentes régions d'un spectre solaire projeté sur un écran. Les caractères restent obscurs dans la région infra-rouge et dans la partie lumineuse jusqu'au vert; ils s'illuminent dans le bleu, le violet et l'ultra-violet.

Oculaire fluorescent. — Dans un spectroscope construit pour l'observation des spectres ultra-violets et dont les prismes et les lentilles sont en *quartz* (**514**), une lame fluorescente, telle qu'un *verre coloré par un sel*

(1) Si l'on a projeté sur l'écran un spectre pur, on constate directement la présence de raies dans la région ultra-violette, devenue visible.

(2) Lorsqu'il a cessé, après cette reprise, d'être phosphorescent, il ne s'illumine plus si on vient à le chauffer de nouveau.

d'urane, est disposée au plan focal que vise l'oculaire. Un spectre ultra-violet projeté sur la lame, provoque sa fluorescence et l'illumine. Les *raies d'absorption* sont obscures sur le fond éclairé.

Radiations émises. — Les rayons émis varient avec la nature de la substance; ils sont d'un bleu de ciel avec le sulfate de quinine, rouges avec une solution alcoolique de chlorophylle.

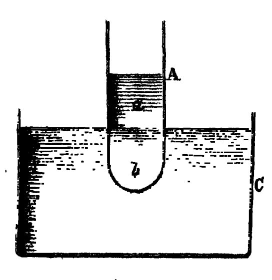


Fig. 601.

Émission après absorption. — Les couches liquides fluorescentes sont les plus superficielles. Si l'on projette un faisceau de lumière solaire ou électrique sur une cuve C qui contient une solution acidulée de sulfate de quinine, le liquide ne s'illumine qu'au voisinage de la face d'entrée de la lumière (fig. 601). Les radiations excitatrices *sont absorbées par les premières couches*. Ces couches produisent après absorption, l'émission laiteuse spéciale à la fluorescence.

Un tube A, plongé dans la cuve, n'est fluorescent et d'ailleurs, seulement à sa surface, que dans sa partie *a* non immergée; il est transparent sans fluorescence dans sa partie *b* immergée.

LENTILLES ACHROMATIQUES

528. Dispersion des images par réfraction. — Une lentille convergente concentre, en des foyers *distincts*, les radiations d'une source lumineuse; le foyer violet est plus rapproché de la lentille que le foyer rouge (fig. 602). Avec une lentille divergente, un foyer virtuel violet est encore distinct du foyer rouge.

La séparation des différentes couleurs conduit à des *images aux contours irisés*. Les images de différentes couleurs d'un point B

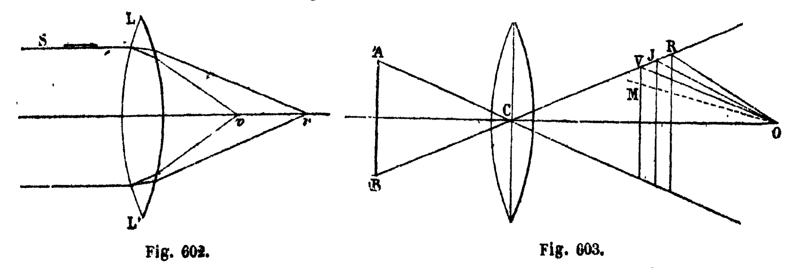


Fig. 602. Fig. 603.

d'un objet AB se font sur le même axe secondaire BC, puisque la

position du centre optique est indépendante de la couleur (**482**); mais, comme ces images sont espacées de V en R (fig. 603), il se fait autant d'images de l'objet qu'il y a de couleurs, et ces images se trouvent dans des plans conjugués différents (1).

Achromatisme. — On corrige la dispersion par réfraction ou l'**aberration de réfrangibilité** en assemblant deux lentilles de substances spéciales, de courbures choisies. Un système réfringent qui donne des images sans irisations est dit *achromatique*.

Une lentille achromatique est formée de deux lentilles : l'une C, convergente, en *crown* (silicate de potasse et de chaux analogue au verre ordinaire), l'autre F, divergente, en *flint* (plus dispersif, une partie de la chaux est remplacée par de l'oxyde de plomb); la seconde lentille est appliquée sur une des faces de la première (fig. 604).

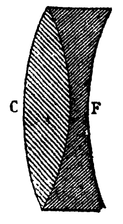


Fig. 604.

Mécanisme de l'achromatisme. — Quand une lentille convergente reçoit les rayons d'un point P situé sur son axe principal (fig. 605), les rayons réfractés rouges et violets convergent séparément en R et en V.

Si une lentille divergente reçoit un rayon SP_1 qui converge (**543**) en P_1 entre le deuxième foyer principal et la lentille) (fig. 606) : les foyers

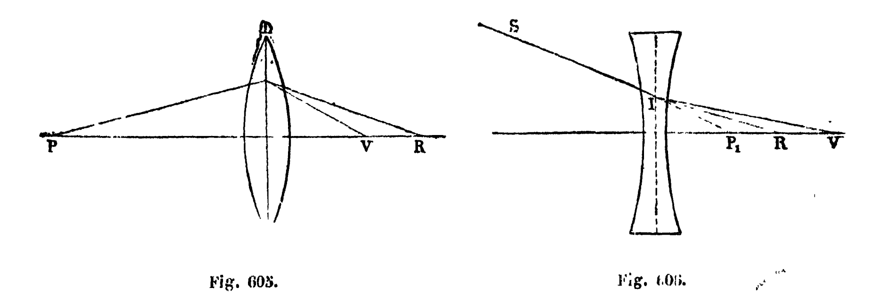


Fig. 605. Fig. 606.

conjugués du point P_1 s'étalent entre R et V, et le rayon rouge est cette fois le moins écarté de la lentille.

Appliquons l'une contre l'autre une lentille convergente et une lentille divergente, de même axe principal PP′ (fig. 607), V et R étant les deux foyers conjugués violet et rouge d'un point P par rapport à la lentille convergente, la lentille divergente les écarte en sens inverse (fig. 606), et V s'éloignant cette fois plus que R, ils peuvent être réunis en P′.

(1) Un écran déplacé de V en R pour recevoir les images ne donne en aucune position une image dépourvue d'irisations.

D'un point O on voit dans des directions différentes les images V, J, R d'un point (fig. 603), l'image de l'objet paraît blanche au centre et irisée sur les bords; les images observées dans une direction OM ne sont pas les images colorées d'un même point puisqu'elles ne correspondent pas à un même axe secondaire.

Avec deux lentilles de *même* substance, les deux foyers conjugués V et R ne peuvent être amenés en P′ sans que la *déviation* soit aussi *annulée* et le système cesse d'être convergent.

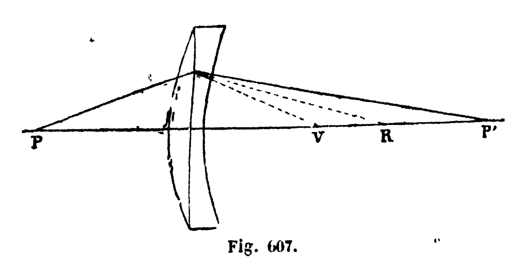


Fig. 607.

Pour que le système reste convergent, les deux lentilles doivent être *de substances différentes* ; les substances sont choisies de manière à amener exactement en coïncidence les foyers définitifs de deux couleurs ; il subsiste une dispersion, d'ordinaire négligeable, quand l'achromatisme a été réalisé pour *l'orangé* et le *bleu* (raies C et F).

Lorsque le système a les mêmes foyers principaux pour l'orangé et le bleu, les foyers conjugués orangé et bleu qui correspondent à un point lumineux quelconque sont aussi en coïncidence.

Si, en effet, $\frac{1}{F_o} = \frac{1}{F_b}$, les équations $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'_o} = \frac{1}{F_o}$ et $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'_b} + \frac{1}{F}$ donnent pour un même point de distance p des valeurs égales : p'_o et p'_b.

La distance focale F du système achromatique est donnée par $\frac{1}{F} = \frac{1}{f} - \frac{1}{f'}$; f distance focale de la lentille convergente, f' distance focale de la lentille divergente.

Si les foyers principaux orangé et bleu F_o et F_b coïncident, on a :

$$\frac{1}{f_o} - \frac{1}{f'_o} = \frac{1}{f_b} - \frac{1}{f'_b}, \qquad \text{d'où}$$

$$(m_o - 1)\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}\right) - (m'_o - 1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R'_1}\right) = (m_b - 1)\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}\right) - (m'_b - 1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R'_1}\right)$$

R et R′, rayons de la lentille convergente, R_1 et R'_1 rayons de la lentille divergente.

On en déduit la relation d'achromatisme $\frac{m_o - m_b}{m'_o - m'_b} = \frac{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R'_1}}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}}$

Les indices des deux substances étant donnés, les quatre rayons de courbure exigent quatre équations pour être déterminés, la condition d'achromatisme en est une, les trois autres s'établissent de la façon suivante : 1° on fixe la distance focale F de la lentille achromatique suivant l'usage qu'elle doit remplir ; 2° les deux faces en contact ont le même rayon de courbure, $R_1 = R'_1$; 3° on écrit une équation qui exprime la condition d'aberration minimum de sphéricité.

L'emploi des lentilles achromatiques est indispensable dans les lunettes de fort grossissement et les microscopes de grande puissance.

---

(1) Les variétés de verre dont on dispose actuellement permettent de réaliser l'achromatisme d'une façon très satisfaisante.

ARC-EN-CIEL

529. Description. — L'arc-en-ciel est dû à la réfraction et à la réflexion de rayons lumineux dans des gouttes de pluie éclairées par le Soleil. C'est un anneau, formé d'arcs concentriques, dont la concavité regarde le sol, il est coloré des couleurs du spectre ; le rouge est à l'extérieur de l'anneau, le violet à l'inétrieur et les couleurs se succèdent, du rouge au violet, dans le même ordre que dans le spectre.

Le phénomène n'a lieu que si le Soleil est peu élevé sur l'horizon ; en outre, l'observateur doit tourner le dos au Soleil et avoir les yeux dirigés sur un nuage qui reçoit les rayons solaires en se résolvant en pluie.

Explication de l'arc rouge. — Soit un rayon de lumière simple, rouge par exemple, qui tombe suivant SI sur une goutte d'eau. Ce rayon pénètre en partie dans la goutte en se réfractant et se réfléchit partiellement en R à l'intérieur. Son angle d'incidence étant i, l'angle d'émergence en J est aussi, d'après la construction, égal à i (fig. 608).

Sa déviation, d, est une somme de déviations partielles, $i - r$ en I, $180^o - 2r$ en R, $i - r$ en J ;

$$d = i - r + 180 - 2r + i - r = 180^0 + 2(i - 2r).$$

Un rayon S'I', voisin de SI et parallèle à SI, rencontre la même goutte en un autre point I'. L'incidence étant i', la déviation a pour valeur $180^0 + 2(i' - 2r')$; r se calcule, d'après la relation $\sin i = m \sin r$, en fonction de i et de l'indice m de l'eau pour le rouge.

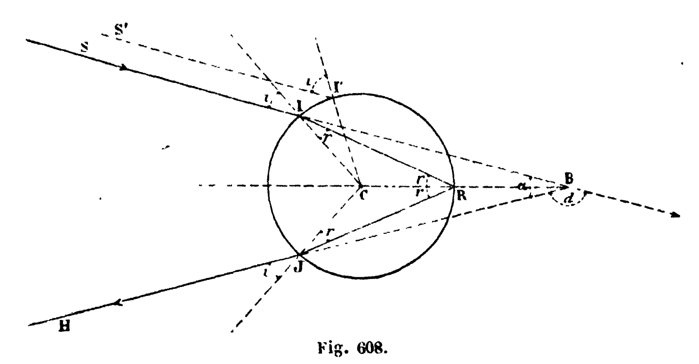


Fig. 608.

Les différents rayons parallèles qui tombent sur la goutte ont donc des *déviations différentes*, qui ne dépendent que de l'incidence ; ils émergent dans des directions différentes de la direction JH qui correspond à SI. Un faisceau incident sort ainsi *en divergeant* et, par son éparpillement, il n'envoie sur la petite surface d'un œil placé loin de la goutte qu'une quantité de lumière trop faible pour l'impressionner.

Rayons efficaces. — Le calcul de la déviation qui se rapporte aux diverses valeurs de l'incidence i, montre qu'elle passe par un *minimum* pour une valeur i_1 d'environ 60^0. Soit SL le rayon qui tombe sous

l'incidence i_1; des rayons parallèles, voisins de SL, tombent sous des incidences peu différentes et, comme il s'agit d'un minimum, la déviation d_1 variera infiniment peu avec l'incidence. Les rayons émergents qui

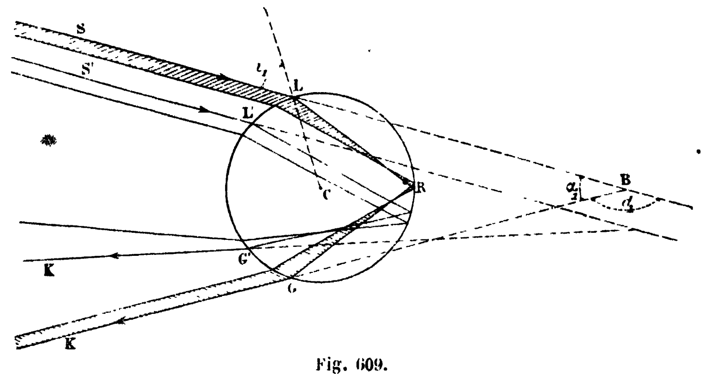


Fig. 609.

proviennent de ce faisceau de rayons seront donc très sensiblement parallèles entre eux : un œil qui reçoit ce faisceau est impressionné d'une façon appréciable. Ces rayons émergents GK sont dits *efficaces* (fig. 609).

Pour le rouge, le supplément α_1 de d_1 est égal à 42°, c'est un maximum, α étant maximum quand d est minimum.

Menons, par l'œil de l'observateur, un axe OX parallèle à la direction SE des rayons solaires incidents (fig. 610); les gouttes d'eau qui se trou-

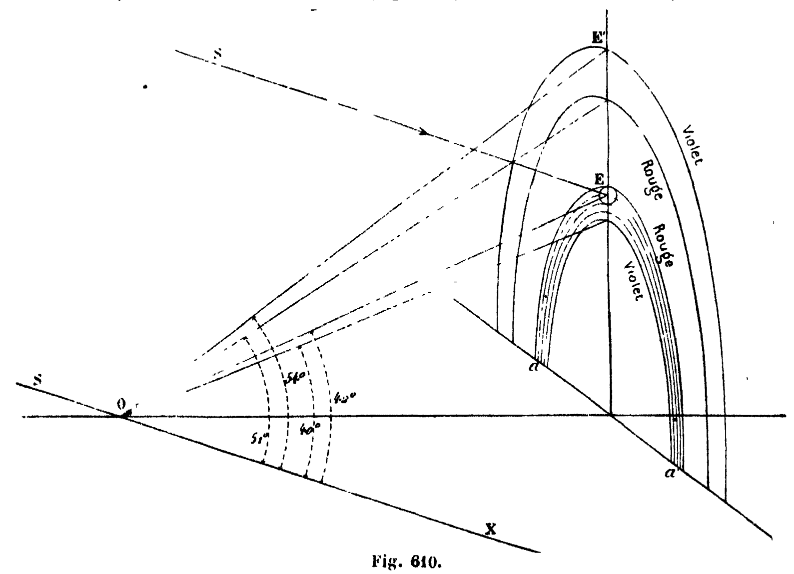


Fig. 610.

vent sur les génératrices d'une surface conique faisant un angle de 42° avec l'axe OX enverront à l'œil de l'observateur des rayons efficaces rouges et, dans ces directions, les gouttes paraîtront rouges.

Irisations. — La valeur de la déviation minimum d_1 et, par conséquent, du maximum α_1 varie avec la couleur, c'est-à-dire avec l'indice de l'eau pour les différentes radiations. L'angle α_1 est de 40° pour le violet.

La lumière solaire étant blanche, on a une circonférence rouge de 42°, une circonférence violette de 40° et des circonférences comprises entre 40° et 42° pour les couleurs intermédiaires. Les couleurs successives ne forment pas un spectre pur, à cause du diamètre apparent du Soleil (1).

L'horizon cache la partie inférieure de l'arc-en-ciel. On ne voit pas d'arc-en-ciel si le soleil est assez élevé pour que la ligne OX soit inclinée au-dessous de l'horizon d'un angle supérieur à 42°.

Arc-en-ciel extérieur. — On voit souvent simultanément un autre arc-en-ciel, *extérieur* au précédent et *moins brillant;* il présente le rouge à l'intérieur, le violet à l'extérieur. Cet arc-en-ciel a un angle de 51° pour le rouge et de 54° pour le violet (fig. 611).

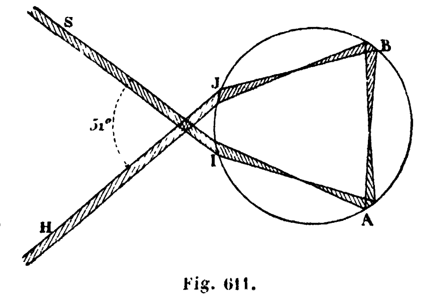


Fig. 611.

Il s'explique, comme le premier, par l'existence de *rayons efficaces* et provient de rayons qui sortent d'une goutte après deux réflexions intérieures (fig. 611). Ce second arc-en-ciel est plus pâle que le premier parce que les rayons qui lui correspondent sont réfléchis une fois de plus à l'intérieur des gouttes.

VISION

530. Description de l'œil (fig. 612). — L'œil, organe de la vision, est un globe sphéroïdal mobile dans une cavité osseuse du crâne appelée *orbite*. L'œil est constitué par une membrane nerveuse *impressionnable* à la lumière, la *rétine*, et par un *appareil dioptrique* formé par les milieux de l'œil, qui fait *converger* la lumière extérieure sur la rétine. Les milieux de l'œil sont entourés par une triple enveloppe : 1° A l'extérieur, une membrane blanche, fibreuse, très résistante S, la *sclérotique*, opaque, sauf sur la partie antérieure où elle devient la *cornée transparente*, C plus bombée que la sclérotique. La sclérotique donne insertion aux muscles mo-

(1) Le Soleil ayant un diamètre apparent de 30′ et chacun des points du Soleil envoyant des rayons efficaces d'une incidence de 60°, les directions efficaces font entre elles un angle de 30′. Une couleur n'est pas distribuée, d'après cela, sur une seule circonférence, mais sur un anneau dont l'épaisseur angulaire est de 30′. Les anneaux de diverses couleurs empiètent les uns sur les autres dans la partie moyenne de l'arc-en-ciel; les couleurs ne sont pures que sur les arcs extrêmes.

teurs du globe de l'œil, fixés d'autre part aux parois de l'orbite.

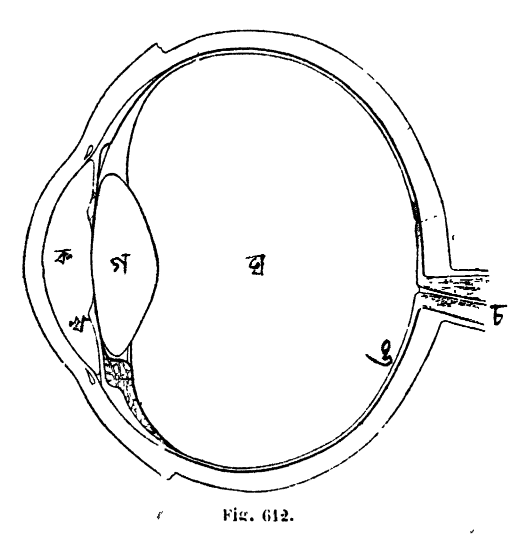


Fig. 612.

2° Une membrane vasculaire très mince Ch, la *choroïde,* qui double intérieurement la sclérotique, sauf en avant. Un pigment noir tapisse la face interne de la choroïde et fait de l'intérieur de l'œil une véritable chambre noire.

Une membrane verticale I, opaque et colorée à sa face antérieure, l'*iris,* adhérant par son périmètre extérieur à la choroïde, partage l'œil en deux compartiments inégaux. Ce diaphragme, de nature musculaire, est percé d'une ouverture centrale et circulaire p, de 3 à 4 mm. de diamètre, appelée *pupille,* par laquelle la lumière pénètre dans l'œil.

Un liquide incolore, l'*humeur aqueuse* A, ayant à peu près, comme la cornée transparente, le même indice de réfraction que l'eau, forme un ménisque convergent dans l'espace compris entre la cornée et l'iris (*chambre antérieure*).

Immédiatement derrière l'iris, est placé le *cristallin* L, lentille biconvexe transparente, plus réfringente que l'humeur aqueuse. Le cristallin est enchassé dans une collerette musculaire (muscle ciliaire) qui forme le prolongement extérieur de la choroïde.

En arrière du cristallin, l'*humeur vitrée* V, remplit le fond de l'œil ou *chambre postérieure.* C'est une masse transparente, gélatineuse; son indice diffère très peu de celui de l'humeur aqueuse.

3° Sur le fond de l'œil, la choroïde est recouverte par la *rétine* R, épanouissement mince, translucide, des fibres du nerf optique(1).

Le nerf optique O traverse la sclérotique et se rend dans la masse cérébrale par une ouverture du fond de l'orbite. L'impression de la

(1) La partie la plus sensible de la rétine est une *tache jaune* de deux millimètres environ de diamètre, qui présente en son centre une petite dépression J dite *fosse centrale.* En dehors de la tache jaune se trouve la *papille* ou *point aveugle,* disque blanchâtre, insensible à la lumière, par lequel le nerf optique O s'épanouit sur la rétine. La coupe de la figure 612 passe par le milieu de la tache jaune et le centre de la papille.

lumière sur la rétine est transmise au cerveau par le nerf optique.

531. Rôle optique de l'œil. — L'œil est une chambre noire qui a la pupille pour ouverture et dont l'écran est la rétine.

Les milieux de l'œil : cornée et humeur aqueuse, cristallin, corps vitré, et rétine, sont terminés par des surfaces sensiblement *sphériques, centrées sur un même axe,* l'axe du cristallin. L'ouverture de la pupille ne laisse passer que des rayons voisins de l'axe.

L'iris, en contractant ses fibres, diminue l'ouverture de la pupille. Les variations instinctives de cette ouverture, proportionnent à la sensibilité de la rétine la quantité de lumière qui passe. La pupille se dilate en effet dans l'obscurité et se contracte à la lumière.

Des rayons parallèles à l'axe du cristallin, tombant sur la cornée, sont rendus convergents par l'humeur aqueuse, plus convergents encore par le cristallin. Le système convergent donne sur la rétine une image d'un objet, *réelle et renversée* (fig. 613).

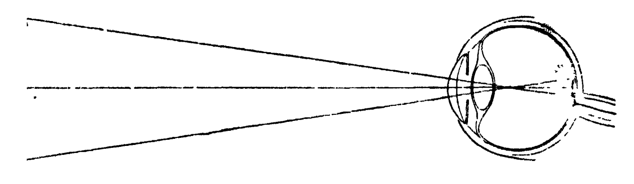


Fig. 613.

Avec un œil de bœuf dont la cornée est tournée vers un objet AB et dont la sclérotique a été assez amincie extérieurement pour devenir translucide, on voit se dessiner sur le fond une image A'B' réelle, renversée, plus petite que l'objet. Les lignes qui joignent les images à leurs points lumineux *passent toutes par un même point* C, situé sur l'axe et voisin de la face postérieure du cristallin.

Le *système convergent de l'œil a un centre optique et deux foyers* (1); *son foyer principal postérieur tombe sur la rétine.*

L'expérience démontre que : 1° La production d'une *image rétinienne* est indispensable à la vision. 2° Pour la vision nette, la rétine doit être le

(1) Le système convergent de l'œil sépare deux milieux inégalement réfringents, l'un ayant l'indice de l'air et situé en avant de la cornée, l'autre ayant sensiblement l'indice de l'eau et formé par l'humeur vitrée. Ce système présente un *foyer principal antérieur* et un *foyer principal postérieur*. Ce dernier est le point de concours des rayons extérieurs parallèles à l'axe du cristallin.

La théorie des *lentilles infiniment minces* ne rend pas compte des conditions de la réfraction à travers les milieux de l'œil : il s'agit ici de **lentilles épaisses** recevant des rayons voisins de leur axe principal commun.

Œil réduit. — Le système convergent de l'œil peut être remplacé par un *dioptre* ou une *surface sphérique* unique ayant son centre en C, centre optique de l'œil (fig. 614), et

plan conjugué de l'objet par rapport au système convergent de l'œil. Le cône convergent qui aboutit à l'image d'un point doit avoir son *sommet* sur la rétine. 3° Les détails sont d'autant plus nets que l'image rétinienne est *plus grande*. 4° Une image se dessine sur chaque rétine, mais les impressions se *superposent* en une image unique.

532. Image rétinienne. — Pour former une image, on joint séparément au centre optique de l'œil les différents points de l'objet et l'on prolonge les axes secondaires jusqu'à la rétine.

On appelle *diamètre apparent* d'une droite *ab* (fig. 616) l'angle *aob* des lignes qui joignent le centre optique *o* aux extrémités *a* et *b* de la droite; la grandeur de l'image rétinienne est proportionnelle au diamètre apparent de la droite vue du centre optique. Dans un

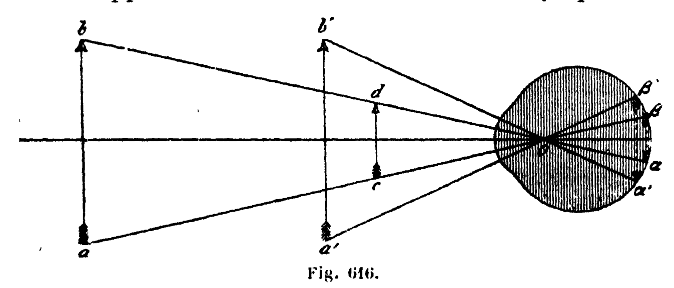


Fig. 616.

œil normal, la distance du centre optique à la rétine étant 15 millimètres, le rapport de grandeur de l'image rétinienne à l'objet est $\frac{I}{O} = \frac{15}{D}$, D distance de l'objet au centre optique (en mm.).

C'est par la grandeur de leurs diamètres apparents que nous jugeons de la grandeur relative d'objets placés à la même distance.

533. Distance de la vision distincte. — C'est la distance à laquelle un objet est vu distinctement. Si le pouvoir réfringent du système optique de l'œil était invariable, il n'y aurait qu'une distance

séparant deux milieux inégalement réfringents : l'*air* et l'*humeur vitrée*. Le rayon R de

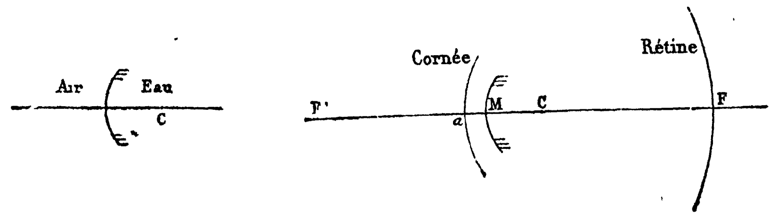


Fig. 614. Fig. 615.

cette sphère fictive est un peu supérieur à 5 millimètres. L'œil ainsi simplifié s'appelle *œil réduit*. Sa surface M est à 3 millimètres en arrière de la surface de la cornée transparente, *a*M = 3 millimètres (fig. 615). La distance C*a* est 8 millimètres.

de vision distincte; en réalité, les limites de la vision distincte sont assez larges, en raison d'une *adaptation de l'œil* aux distances, appelée **accommodation**, qui amène une image à se former sur la rétine. L'œil n'est pas adapté *simultanément* pour un objet rapproché et pour un objet éloigné. Ainsi, un seul œil étant ouvert, si l'on pose deux épingles l'une devant l'autre, on voit nettement la première en la fixant, la seconde est confuse; si l'on fixe la seconde, la première devient confuse.

Mécanisme de l'accommodation. — En plaçant une bougie allumée devant l'œil d'un sujet, dans une chambre noire, on voit trois images (fig. 617) : 1° *a, droite*, virtuelle, due à la réflexion sur la surface convexe de la cornée 2° *b*, *droite*, virtuelle, plus grande et plus pâle que la précédente, due à la réflexion sur la surface antérieure du cristallin, qui est moins convexe que la cornée; 3° *c*, petite, *renversée* et réelle, par réflexion sur la concavité postérieure du cristallin.

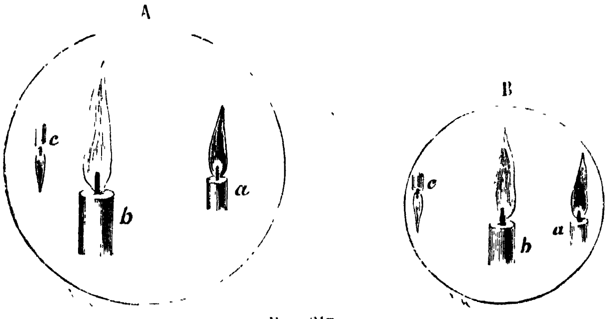


Fig. 617.

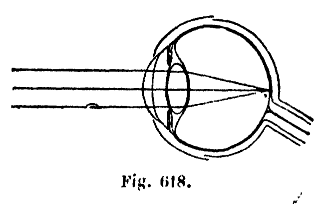
Si la vue du sujet est portée brusquement d'un objet éloigné, fig. (A) à un objet rapproché, fig. (B), l'image cornéenne de la bougie, *a*, ne varie pas, l'image, *b*, diminue de hauteur, par une *augmentation de convexité* de la face antérieure du cristallin; la troisième image, *c*, varie très peu.

L'augmentation de convexité de la face antérieure du cristallin, vérifiée par des mesures directes, avec un appareil appelé *ophtalmomètre*, diminue la distance focale principale du système optique de l'œil. A mesure que l'objet se rapproche de l'œil, son image se trouve ainsi ramenée sur la rétine, ce qui permet de voir successivement à différentes distances. L'accommodation ne dépasse pas une certaine limite.

Distance minimum de la vision distincte. — On appelle *punctum remotum* le point le plus éloigné, vu sans accommodation, et *punctum proximum* le point le plus rapproché, vu par accommodation. Quand un objet passe du punctum remotum au punctum proximum, la convergence augmente par l'accommodation, comme si on accolait à l'œil une lentille convergente.

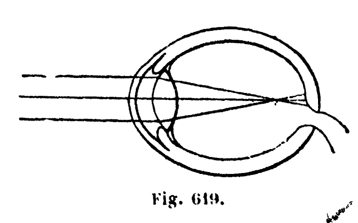
Les conditions de la vision dépendent de la position de la rétine par rapport au plan focal principal postérieur du système convergent de l'œil, dans le relâchement complet de l'accommodation.

Œil emmétrope. — L'œil est dit normal ou *emmétrope,* si l'image d'un point lumineux éloigné (1) se fait sur la rétine sans accommodation (fig. 618). Lorsque le point se rapproche, son image se fait au delà de la rétine; le cône convergent de l'image est coupé par la rétine suivant un *cercle de diffusion* dont le rayon va en croissant quand le point se rapproche et l'image devient de moins en moins nette. L'accommodation ramène alors l'image sur la rétine. Le *punctum proximum* se trouve à environ 20 centimètres pour un œil emmétrope. Le *punctum remotum* est à l'infini.

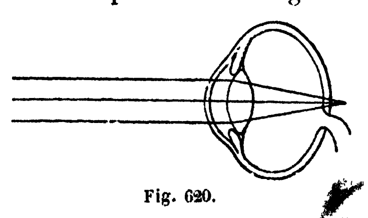

Fig. 618.

L'amplitude d'accommodation est la convergence d'une lentille qu'il faudrait appliquer contre l'œil pour voir le *punctum proximum* sans accommodation.

Œil myope. — L'œil est brachymétrope ou *myope,* si, par suite d'une trop grande convergence du système optique, l'image d'un point éloigné se fait, sans accommodation, en *f* en avant de la rétine (fig. 619). Le *punctum remotum* est le point dont l'image se fait alors sur la rétine. Pour des objets plus rapprochés, l'accommodation intervient et le *punctum proximum* est ordinairement plus rapproché de l'œil que pour l'œil normal. Aussi, l'angle sous lequel un œil myope peut voir les petits objets est plus grand. Le *parcours d'accommodation* est peu étendu dans le cas de forte myopie.


Fig. 619.

Œil hypermétrope. — L'œil est *hypermétrope* lorsque, par suite d'une trop faible convergence du système optique, les rayons venant de l'infini se réunissent, sans accommodation (fig. 620) *en arrière* de la rétine; les cônes convergents réfractés sont coupés par la rétine suivant des cercles de diffusion. Par un œil hypermétrope, aucun objet


Fig. 620.

(1) Un point situé à 5 mètres envoie sur l'œil des rayons sensiblement parallèles; au delà, un objet est vu sans accommodation par un œil emmétrope.

n'est vu distinctement sans accommodation. Par l'accommodation, une légère hypermétropie passe inaperçue; la convergence augmente de façon à diminuer la distance focale et amène sur la rétine l'image d'un objet éloigné. Le *punctum proximum* est ordinairement plus éloigné que pour un œil emmétrope.

Presbytie. — Pour tous les yeux, le pouvoir accommodateur de l'œil diminue par l'effet de l'âge, en raison d'un décroissement lent de la flexibilité du cristallin. Le *punctum proximum* s'éloigne, il y a presbytie quand il devient distant de 50 à 60 centimètres. Les emmétropes devenus presbytes tiennent un livre éloigné pour lire nettement. La presbytie apparaît plus tôt chez les hypermétropes.

Puissance de l'œil. — Un objet est vu sous le plus grand diamètre apparent et peut être le mieux étudié dans ses détails quand il est placé au *punctum proximum*. A cette distance Δ, le *diamètre apparent de l'unité de longueur*, $\frac{1}{\Delta}$, est la puissance de l'œil; elle est exprimée en radians, si Δ est exprimé avec la même unité que l'unité de longueur observée (1).

Pouvoir séparateur. — Habituellement, l'œil sépare deux objets dont l'écart est vu sous un angle de 1′ ou environ $\frac{3}{10000}$ de radian. L'écart linéaire de deux points séparés par un œil emmétrope qui peut voir à 20 centimètres est $\frac{20.3}{10000}$. Pour un œil myope qui voit à 5 centimètres, l'écart observable devient quatre fois plus petit et permet l'examen de détails quatre fois plus fins qu'avec l'œil emmétrope.

534. Besicles. — Si l'œil n'est pas emmétrope, on fait usage de besicles afin qu'après réfraction, des rayons parallèles concourent sur la rétine, comme dans l'emmétropie.

Correction de la myopie. — L'œil myope étant trop convergent, les rayons parallèles à l'axe sont concentrés en avant de la rétine (fig. 619). Pour corriger la myopie, on applique contre l'œil une lentille divergente de distance focale égale à la distance D du *punctum remotum* (fig. 621); le point de concours vir-

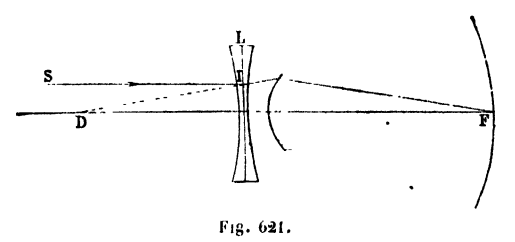
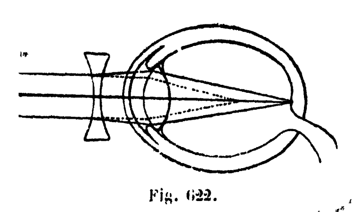


Fig. 621.

(1) Le rapport $\frac{1}{\Delta}$ ne peut être appelé diamètre apparent que si l'unité de longueur est assez petite (par exemple un millimètre), pour que, dans l'évaluation de l'angle, l'arc et la tangente puissent être confondus.

tuel des rayons parallèles à l'axe, réfractés par la lentille divergente, étant en avant à la distance D, les rayons reçus par l'œil semblent partir de ce point et sont concentrés sur la rétine (fig. 622). La lentille divergente donnant pour un objet compris entre l'infini et la lentille une image droite, comprise entre son foyer et la lentille, le myope verra à toute distance (1).


Fig. 622.

Correction de l'hypermétropie. — L'œil hypermétrope *n'étant pas assez convergent*, les rayons parallèles à l'axe sont concentrés en arrière de la rétine. Quand l'hypermétropie est accentuée, le *punctum proximum* est plus éloigné de l'œil que celui de l'emmétrope (2). Pour corriger l'hypermétropie, on applique une lentille convergente contre la face antérieure de l'œil. Si l'on veut, par exemple, voir nettement un point M, plus rapproché que le punctum proximum et placé à une distance D, il faut que les rayons issus de M et réfractés par la lentille avant de pénétrer dans l'œil. paraissent venir d'un point M′ plus éloigné que M et situé au delà du punctum proximum. Il faut pour cela une lentille convergente dont la distance focale est un peu supérieure à la distance du point M à l'œil.

Astigmatisme. — Nous avons supposé jusqu'ici que les surfaces des milieux de l'œil étaient des surfaces de révolution autour de l'axe principal et que les amétropies (myopie et hypermétropie) étaient symétriques. L'œil peut être atteint d'une amétropie *asymétrique* appelée astigmatisme, dans laquelle le rayon de courbure d'une ou de plusieurs des surfaces réfringentes (principalement de la cornée C) n'est pas le même dans tous les méridiens (3) (fig. 623), tel méridien étant emmétrope, myope ou hypermétrope. Un œil astigmate voit mieux des droites horizontales que des droites verticales ou inversement.

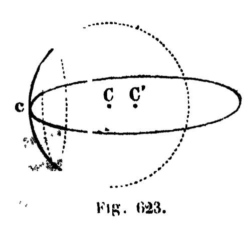


Fig. 623.

(1) Le *numéro* d'une lentille de correction est sa convergence en *dioptries* ou l'inverse de sa distance focale évaluée en mètres. Si le *punctum remotum* est à une distance D = 0^m25, le numéro est — 4 (**496**). Par un ancien usage, on désigne encore souvent un verre de correction par sa distance focale en pouces (le pouce vaut $2^{cm},78$). Pour obtenir le numéro en dioptries d'un verre dont le numéro est connu en pouces, on divise 36 par le numéro en pouces (100 = 36 . 2,78). Si la lentille de correction n'est pas exactement appliquée contre la face antérieure de l'œil, mais se trouve à une distance *d*, la distance focale devra être D — *d* pour que le point de concours des rayons réfractés par la lentille reste à la distance D de la surface antérieure de l'œil.

(2) L'accommodation doit en effet, chez l'hypermétrope, s'exercer entre des limites plus étendues que chez l'emmétrope.

(3) Le dioptre équivalent à l'œil réduit n'est plus de révolution autour de l'axe.

Correction de l'astigmatisme. — Un astigmatisme pourrait être produit sur un œil emmétrope par une lentille cylindrique (1), il serait ensuite corrigé par une seconde lentille cylindrique, *complémentaire*, adaptée sur la première et formant avec elle un système à faces parallèles, sans réfringence. Il en résulte qu'un astigmatisme se corrigera avec une lentille cylindrique, de réfringence et d'orientation convenables qui augmente ou diminue la convergence dans le méridien perpendiculaire aux génératrices de la lentille.

Correction de la presbytie. — Pour voir de loin, un presbyte n'a pas besoin de verre. La puissance d'accommodation n'est plus suffisante pour amener sur la rétine l'image d'un objet rapproché. Soit d la distance minimum à laquelle un point doit se trouver de la face antérieure de l'œil presbyte pour donner son image sur la rétine. La correction doit faire voir nettement un objet placé à la distance Δ du *punctum proximum* d'un œil normal. On dispose pour cela devant l'œil une lentille convergente L, de distance focale φ, elle fonctionne comme loupe (**542**). Un objet placé à la distance Δ est reporté à la distance d du même côté de la lentille (fig. 624), si les distances d et Δ sont conjuguées par rapport à la lentille. L'équation : $\frac{1}{\Delta} - \frac{1}{d} = \frac{1}{\varphi}$, donne φ.

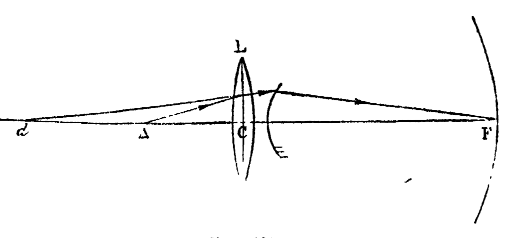


Fig. 624.

Ophtalmoscope. — L'ophtalmoscope sert à observer la rétine et à déterminer les amétropies de l'œil.

Les petites dimensions de la pupille ne laissant pénétrer dans l'œil que peu de lumière, on concentre sur l'œil à observer la lumière d'une lampe réfléchie sur un miroir concave. On examine l'œil par un trou percé dans le miroir, on voit alors une image de la rétine fournie par les milieux réfringents de l'œil.

535. Évaluation des distances. — On appelle *axe visuel* la ligne qui joint un point observé à la partie la plus sensible de la rétine (*tache jaune*), cette ligne passe par le centre optique et diffère peu de l'axe optique du système convergent de l'œil.

Les axes visuels de chacun des deux yeux, dirigés d'eux-mêmes vers un point A qu'on regarde, font entre eux un angle a d'autant plus grand que le point est plus rapproché (fig. 625). L'évaluation inconsciente de

(1) Si, dans un cylindre à bases circulaires perpendiculaires à l'axe, on coupe une tranche par un plan parallèle à cet axe, on a une *lentille cylindrique* plan convexe, convergente.

cet angle, d'après l'effort exercé par les muscles de l'œil, fait juger de

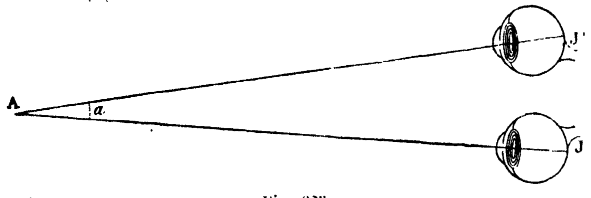


Fig. 625.

la distance. Quand un objet *éloigné* change de distance, l'angle des deux axes varie peu et l'appréciation est incertaine.

On apprécie la **grandeur d'un objet** par son *diamètre apparent* (grandeur de l'image rétinienne) et par sa distance (*angle des axes visuels*).

536. Appréciation du relief. — Regardé avec un seul œil, un objet semble plat comme un dessin : la *vue binoculaire* fait apprécier son relief. En voici la raison.

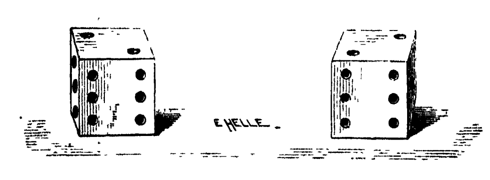
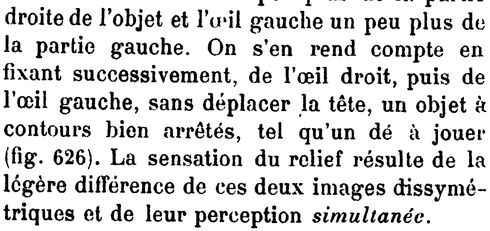


Fig. 626.

Les deux images rétiniennes d'un objet éloigné ne sont pas absolument identiques. Pour un objet à trois dimensions, suffisamment rapproché, l'œil droit voit un peu plus de la partie



droite de l'objet et l'œil gauche un peu plus de la partie gauche. On s'en rend compte en fixant successivement, de l'œil droit, puis de l'œil gauche, sans déplacer la tête, un objet à contours bien arrêtés, tel qu'un dé à jouer (fig. 626). La sensation du relief résulte de la légère différence de ces deux images dissymétriques et de leur perception *simultanée*.

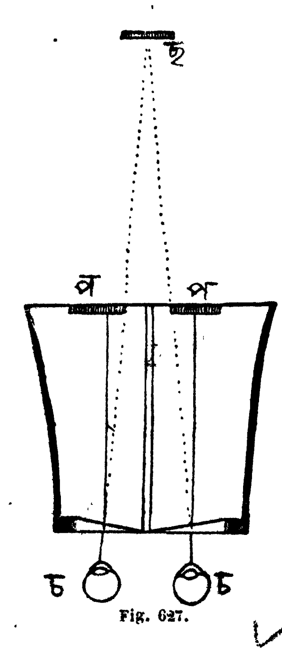


Fig. 627.

Pour confirmer cette explication, deux photographies d'un même objet ont été prises par deux appareils couplés dont les objectifs sont distants l'un de l'autre comme les deux yeux. Ces photographies sont disposées l'une près de l'autre en *a* et en *a'* dans un **stéréoscope** (fig. 627); un prisme *c*, placé devant chaque œil, dévie légèrement les rayons partis de chacune et superpose leur image en *d*. Chacune des images, vue avec l'œil correspondant, présente à chaque rétine l'image qui lui est propre. La simultanéité des impressions donne lieu à une vive sensation du relief.

537. Persistance des impressions sur la rétine. — Une sensation lumineuse persiste

un certain temps après que la cause qui l'a produite a disparu. C'est pour cela que nous voyons, pendant un temps supérieur à leur durée, certains phénomènes extrêmement courts, bien éclairés, par exemple une étincelle électrique; nous voyons aussi, sous l'apparence d'une ligne lumineuse, un point brillant qui se meut avec rapidité. La longueur de la ligne lumineuse est le chemin parcouru par le point lumineux pendant la durée ordinaire de la persistance, sensiblement $0^{sec},1$.

538. Contraste des couleurs. — La vue d'une couleur fait ressortir par une sorte de contraste l'éclat de la couleur complémentaire.

Contraste successif. — Si après avoir regardé une étoffe rouge, on se tourne vers un écran blanc, on y voit du vert, complémentaire du rouge. Si, après avoir regardé l'étoffe rouge, on s'est tourné vers une étoffe verte, celle-ci offre une grande vivacité de coloration.

Contraste simultané. — Un cercle blanc, collé sur un fond rouge, est vu en vert.

INSTRUMENTS D'OPTIQUE

Les *instruments d'optique* aident la vision dans l'observation des objets. Ils augmentent la *puissance* de l'œil, c'est-à-dire l'angle sous lequel il voit l'unité de longueur d'un objet. Les instruments d'optique utilisent principalement des lentilles et des miroirs.

Une lentille convergente est employée de deux façons; tantôt l'objet est placé au delà du foyer principal, et la lentille en donne une image réelle : la lentille porte alors le nom d'*objectif;* tantôt l'objet est placé entre le foyer et la lentille, et la lentille en donne une image virtuelle : la lentille est alors appelée *oculaire.*

Dans la chambre noire et les appareils de projection, la lentille convergente est employée comme objectif.

539. Chambre noire. — La chambre noire décrite précédemment (**435**) est une caisse fermée, à parois intérieures noircies, dont l'une des faces est percée d'une petite ouverture; sur la face opposée est appliqué un écran. On complète l'appareil en fermant l'ouverture par une *lentille convergente* LL' qui sert d'objectif. Sur l'écran du fond, se dessine, au delà du foyer principal (fig. 628), une image

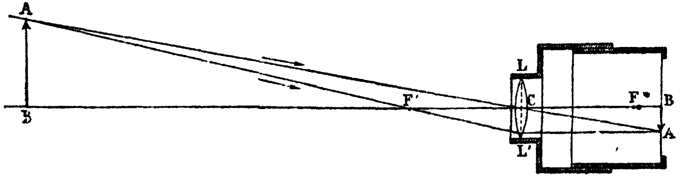


Fig. 628.

réelle et renversée d'objets placés en avant de l'objectif, après qu'un tirage a amené l'écran au foyer conjugué de ces objets.

Par l'addition d'une lentille convergente, le faisceau issu d'un point qui pénètre dans la chambre noire a pour base, non plus une petite ouverture, mais la surface de l'objectif. L'intensité lumineuse de l'image est accrue, et aussi sa netteté, puisque l'image d'un point se réduit alors à son conjugué.

540. Appareil de projection. — La partie essentielle d'un appareil de projection est un objectif O qui donne, sur un écran, une *image réelle, renversée et amplifiée* d'un petit objet transparent. L'écran fait voir, par diffusion, l'image dans toute direction.

L'objet est en AB, au delà du foyer de l'objectif, à une distance de l'objectif moindre que le double de la distance focale, afin d'avoir une image agrandie. La mise au point se fait en déplaçant l'objectif.

L'éclairement de l'image est affaibli (1), puisque la lumière de l'objet se répartit sur une image plus grande. Pour y remédier, à l'aide d'une lentille C, appelée *condenseur*, on concentre sur l'objet les rayons d'une vive lumière L (2). L'objet à projeter (photographie sur verre) est disposé dans un porte-objet AB placé derrière le condenseur (fig. 629): il est placé renversé pour que son image soit droite.

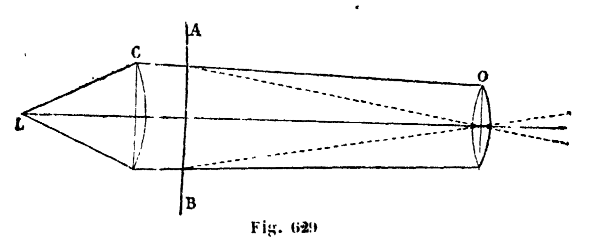


Fig. 629

541. Classement des instruments d'optique proprement dits. — On peut distinguer deux groupes d'instruments d'optique : 1° Les instruments adaptés à la vision *d'objets très rapprochés;* ce sont la **loupe** et le **microscope**. Leur effet utile est défini par leur **puissance**, ou l'angle sous lequel on voit l'unité de longueur à travers l'instrument.

---

(1) D'après l'équation aux foyers conjugués de la lentille $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$, le rapport de grandeur de l'image à l'objet est $G = \frac{I}{O} = \frac{p'}{p} = \frac{p'}{f} - 1$; il est d'autant plus grand que l'écran est plus éloigné et la distance focale de l'objectif plus petite ; G est l'agrandissement d'une dimension linéaire, G^2 est le rapport de la surface de l'image à la surface de l'objet. Si l'on représente par 1 l'éclairement de l'objet, l'éclairement de l'image sera réduit à $\frac{1}{G^2}$ puisque la lumière se distribue sur une surface G^2 fois plus grande.

(2) Lumière solaire, ou lumière électrique, ou lumière Drummond.

2° Les instruments adaptés à la vision *d'objets éloignés;* ce sont **la lunette astronomique** et le **télescope.** Leur **grossissement** est le rapport du diamètre apparent d'un objet vu dans l'instrument à son diamètre apparent en vision directe.

Mise au point. — La mise au point consiste à amener l'image sur la rétine, en la faisant voir sous le plus grand angle possible.

Pour un objet à l'infini, le **pouvoir séparateur** d'un instrument est la *distance angulaire minimum* de deux points qu'il permet de voir distinctement [1]. ***Pour un objet situé à une distance finie***, le pouvoir séparateur est la *distance linéaire minimum* de deux points vus distinctement à travers l'instrument.

LOUPE

542. La *loupe* est une lentille convergente, de petite distance focale, qu'on place devant l'œil pour observer de très petits objets.

Pour observer, à l'œil nu, un objet AD, on doit le rapprocher le plus possible de l'œil, afin de voir ses détails *sous le plus grand diamètre apparent,* mais on ne peut pas le placer plus près que la distance minimum de la vision. Une loupe donne de l'objet une image *virtuelle,* qui est vue sous un angle plus grand qu'à l'œil nu et que l'on observe à la *même distance minimum* de la vision.

Position de l'objet. — *On fait usage d'une loupe, en plaçant l'objet* AD *entre la lentille et son foyer* F'. L'image A'D', est **agrandie, droite** et **virtuelle** (fig. 630).

Marche des rayons. — Placé derrière la loupe, l'œil voit le point A' s'il est dans le cône de sommet A'; il voit le point D' s'il est dans le cône de sommet D. Placé dans la partie commune à ces deux cônes, il reçoit aussi les rayons des divers points intermédiaires.

Fig. 630.

(1) L'inverse est souvent appelé pouvoir séparateur.

Mise au point. — Pour la *mise au point*, on approche lentement la loupe de l'objet jusqu'à ce que l'œil, placé contre la loupe, voie distinctement l'image sous le plus grand angle possible. Comme l'objet est très près du foyer, un faible déplacement fait varier notablement la distance de son image. Un myope rapproche la loupe de l'objet, afin que la distance de l'image à l'œil diminue.

Puissance. — En supposant l'œil au centre optique C, l'angle sous lequel on voit, avec une loupe, l'image A'B' d'un objet AB est ACB ou $\frac{AB}{p}$; cet angle est la puissance ϖ ou $\frac{1}{p}$, si AB = 1. D'après la relation $\frac{1}{p} = \frac{1}{p'} + \frac{1}{f}$, on a sensiblement $\frac{1}{p} = \frac{1}{f}$, car $\frac{1}{p'}$ est négligeable devant $\frac{1}{f}$, à cause de la petitesse de f.

Si l'œil est au foyer F, ce qui est toujours très approché, l'angle est rigoureusement $\frac{AB}{f}$ et pour AB = 1, c'est $\frac{1}{f}$. Cette expression de la puissance est indépendante de la vue de l'observateur.

$\frac{1}{f}$ est la convergence de la lentille et s'évalue en *dioptries* si f est compté en mètres.

L'angle sous lequel on verra *un millimètre* sera $\frac{0,001}{f}$ ou $\frac{1}{1000}$ de la puissance en dioptries.

Pouvoir séparateur. — Le pouvoir séparateur d'une loupe se détermine expérimentalement; il est limité par le pouvoir séparateur de l'œil. Appelons d la distance linéaire minimum (en mètres) de deux points séparés, cette distance est distinguée à travers une loupe d'une puissance de ϖ dioptries si ϖd = arc 1'; d'où $d = \frac{3}{10000.\varpi}$ radian.

Grossissement. — On appelle *grossissement* d'une loupe *le rapport des diamètres apparents* de l'image d'un objet vue à travers la loupe et de cet objet vu sans loupe; l'œil étant appliqué contre la loupe, l'image et l'objet étant observés tous deux à la distance minimum Δ de la vision.

L'angle sous lequel $0^m,001$ est vu à travers la loupe est $0,001\ \varpi$, l'angle sous lequel $0^m,001$ serait vu directement est $\frac{0,001}{p'}$; le rapport est $p'\varpi$.

$$G = p'\varpi = p'\left(\frac{1}{p'} + \frac{1}{f}\right) = 1 + \frac{p'}{f} = 1 + \frac{\Delta}{f}.$$

Le grossissement diminue donc avec la distance de la vision distincte.

Achromatisme de la loupe. — D'après la construction de l'image, une loupe devrait être achromatique, car si les images rouge et violette d'un point A sont séparées, elles se trouvent en prolonge-

ment, sur le même axe secondaire CAA′, pour un œil placé en C. Mais l'œil n'est pas exactement en C, et les images sont irisées.

La loupe montée (fig. 631) est une loupe *m* fixée à une monture en cuivre et pouvant être élevée ou abaissée, pour la mise au point, au moyen d'une crémaillère K. L'objet *b* est placé sur un porte-objet fixe, il est éclairé par-dessous à l'aide d'un miroir légèrement concave M, fixé au support.

La loupe est employée par les horlogers, les graveurs; elle sert à compter les fils des étoffes, etc.

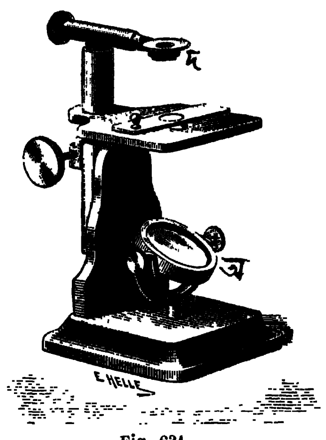


Fig. 631.

MICROSCOPE

543. Le microscope sert, comme la loupe, à l'examen de très petits objets. Il augmente aussi le diamètre apparent sous lequel on les voit. Il est formé de deux systèmes convergents *ayant même axe principal :* 1° un système convergent à court foyer L, ou *objectif*, donnant d'un objet AB une image A′B′ *réelle, renversée, agrandie*. L'objet est placé un peu au delà du foyer principal de l'objectif; 2° un système convergent L′, ou *oculaire*, jouant le rôle de loupe par rapport à l'image fournie par l'objectif. L'œil appliqué contre l'oculaire voit une image A″B″, **virtuelle**, **agrandie**, droite par rapport à A′B′, **renversée** par rapport à l'objet AB.

Construction des images. — L'image réelle A′B′ due à l'objectif et

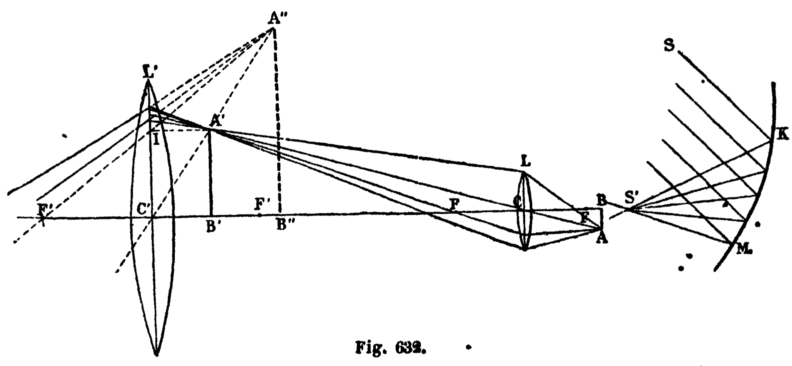


Fig. 632.

l'image virtuelle A″B″ donnée par l'oculaire s'obtiennent par la construction générale (intersection de l'axe secondaire et du rayon réfracté correspondant à un rayon incident parallèle à l'axe) (fig. 632).

Marche des rayons. — Un point A de l'objet envoie sur l'objectif L un cône de rayons qui donne, après réfraction, un nouveau faisceau conique convergeant en A′ sur l'axe secondaire AC. Ce faisceau conique diverge ensuite de A′, rencontre l'oculaire L′, et, après réfraction, offre un faisceau conique divergent venant de A″.

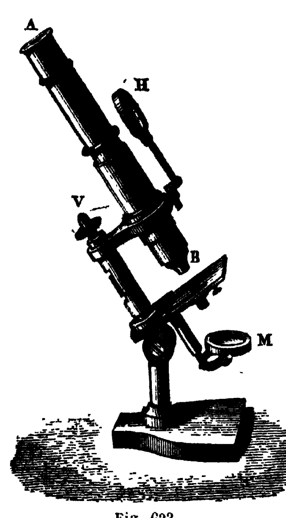


Fig. 633.

Mise au point. — L'oculaire A et l'objectif B (fig. 633) sont adaptés aux deux extrémités d'un tube sur l'axe duquel ils sont centrés. L'objet repose sur un anneau P appelé *platine* ou *porte-objet*. On effectue la mise au point en *déplaçant* par une vis V *le tube du microscope tout entier*, jusqu'à ce que l'image donnée par l'oculaire soit vue à la distance minimum de la vision distincte.

Pour un myope, A′B′ (fig. 632) devra se former plus près de l'oculaire ou plus loin de l'objectif; à cet effet, on éloigne l'objet de l'objectif en déplaçant le tube du microscope (1).

Puissance. — L'angle sous lequel on voit, du point C′, un petit objet AB à travers le microscope est AB. P (P puissance du microscope); c'est aussi l'angle sous lequel on voit l'image A′B′ à travers l'oculaire ou A′B′. ϖ (ϖ puissance de l'oculaire).

$$\text{On a donc} \quad AB.P = A'B'.\,\varpi \qquad \text{ou } P = \frac{A'B'}{AB}\,\varpi.$$

P est le produit du grandissement de l'objectif par la puissance de l'oculaire (2).

(1) Les objets opaques posés sur le porte-objet P sont éclairés par une lentille convergente H ajustée latéralement. Sur les objets transparents on concentre la lumière diffuse du jour par un miroir concave M fixé au-dessous du porte-objet.

(2) En appelant l la longueur du tube du microscope, on a sensiblement $\frac{A'B'}{AB} = \frac{l}{f}$ (f distance focale de l'objectif); d'autre part, si l'oculaire est une simple loupe, $\varpi = \frac{1}{f'}$ (f' distance focale de l'oculaire); de là, approximativement, $P = \frac{l}{ff'}$. On augmentera donc la puissance en prenant un long tube, en diminuant f et f'.

Mesure expérimentale de la puissance. — On adapte au microscope une chambre claire formée de la combinaison d'un miroir plan et d'un prisme à réflexion totale (fig. 634).

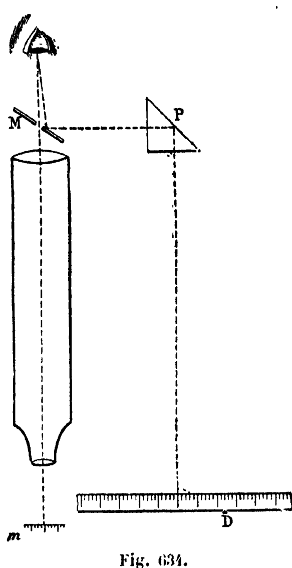


Fig. 634.

Le prisme à réflexion totale est un prisme rectangle P (**470**) dont l'hypoténuse réfléchit les traits d'une règle D divisée en millimètres. Un miroir M, fixé au-dessus de l'oculaire et parallèle à la face hypoténuse du prisme, réfléchit une seconde fois les traits de la règle divisée. Ce miroir est percé d'un trou à son centre et laisse passer les rayons qui proviennent d'un *micromètre,* plaque de verre *m,* divisée en centièmes de millimètres, placée sur le porte-objet. L'œil reçoit dans la même direction et voit à la distance Δ de vision distincte : 1° la règle D par la chambre claire; 2° l'image du micromètre à travers le microscope.

Supposons qu'une division du micromètre couvre N millimètres de la règle, les N millimètres sont vus directement sous l'angle $\frac{N}{\Delta}$ (Δ en millimètres); une division grossie du micromètre est vue d'autre part sous l'angle $\frac{P'}{100}$ (P' est la puissance pour un millimètre).

Les deux angles étant égaux, $\frac{N}{\Delta} = \frac{P'}{100}$. On déduit de là P'. On a $P' = P.\ 0{,}001$; P est la puissance du microscope en dioptries.

Grossissement. — L'angle sous lequel on voit, à travers le microscope, un millimètre d'un objet, est P. 0,001; à l'œil nu, on le voit sous l'angle $\frac{0{,}001}{\Delta}$ (Δ en mètres); le rapport des deux angles, rapport des diamètres apparents ou grossissement, est $P\Delta$ (1).

Grandeur d'un objet. — On place sur le porte-objet un micromètre divisé en centièmes de millimètre et au foyer de l'oculaire un micromètre divisé en fractions arbitraires de millimètre; si K divisions du micromètre objectif couvrent *n* divisions du micromètre oculaire, une division du micromètre oculaire correspond à la longueur $\frac{K}{100\,n}$ sur le porte-objet.

(1) Si la puissance du microscope est 12 mille dioptries et la distance minimum Δ de la vision distincte 20 centimètres, le grossissement est $12000 \times 0{,}20 = 2400$.

D'après cela, si un objet placé sur le porte-objet couvre n' divisions du micromètre oculaire, sa grandeur en millimètres est $\frac{K}{100} \cdot \frac{n'}{n}$.

Pouvoir séparateur. — Le pouvoir séparateur d'un microscope composé se détermine expérimentalement, il peut atteindre $0^{\mu}1$.

Champ. — Le champ du microscope est l'espace qui comprend

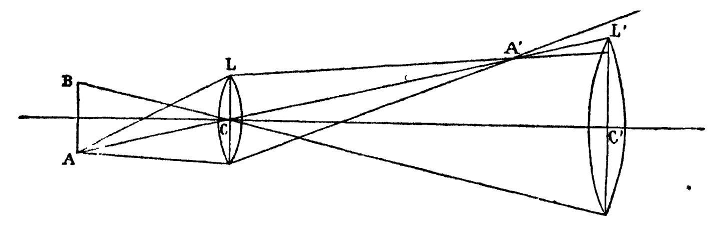


Fig. 635.

tous les points visibles à travers l'oculaire. Un point A n'est vu que si le faisceau qui a pour base l'objectif et pour sommet le foyer conjugué A', rencontre l'oculaire. Ce cône est de très petit angle, vu le petit diamètre de l'objectif ; en le réduisant à son axe, on dit visible tout point A dont l'axe secondaire CA, par rapport à l'objectif, rencontre l'oculaire (fig. 635). Le champ a ainsi pour mesure, dans un plan qui passe par l'axe CC', *l'angle* $\frac{2C'L'}{CC'}$ *des axes secondaires extrêmes qui rencontrent l'oculaire.*

Le champ diminue quand la longueur CC' du microscope augmente, il diminue avec le diamètre 2C'L' de l'oculaire ; or, pour éviter de trop grandes aberrations de sphéricité, on diminue le diamètre de 'oculaire en même temps que sa distance focale. Les conditions *qui augmentent la puissance réduisent donc le champ.*

On mesure le champ en observant à travers le microscope un micromètre placé sur le porte-objet.

Oculaire du microscope. — L'oculaire du microscope est un oculaire *négatif* composé de deux verres, tous les deux convergents. Cet oculaire augmente le champ sans réduire la puissance ; en outre, il diminue les aberrations de sphéricité et de réfrangibilité dues à l'objectif.

Les rayons partis de l'objet AB et réfractés par l'objectif L viendraient former une image de l'objet en A'B' ; avant leur concours, ils sont reçus sur la première lentille L_1 de l'oculaire, appelée *lentille de champ*, qui les rapproche de l'axe du microscope, en remplaçant l'image A'B' par une image plus petite $A'_1B'_1$. Cette image *réelle* est regardée à travers la deuxième lentille L'_1 de l'oculaire qui fonctionne comme *loupe* et donne une image définitive, *virtuelle* et agrandie A''B'' (fig. 636).

Le *champ est augmenté*, car il est défini par un cône qui a pour som-

met le centre optique de l'objectif et pour base la lentille L_1. La len-

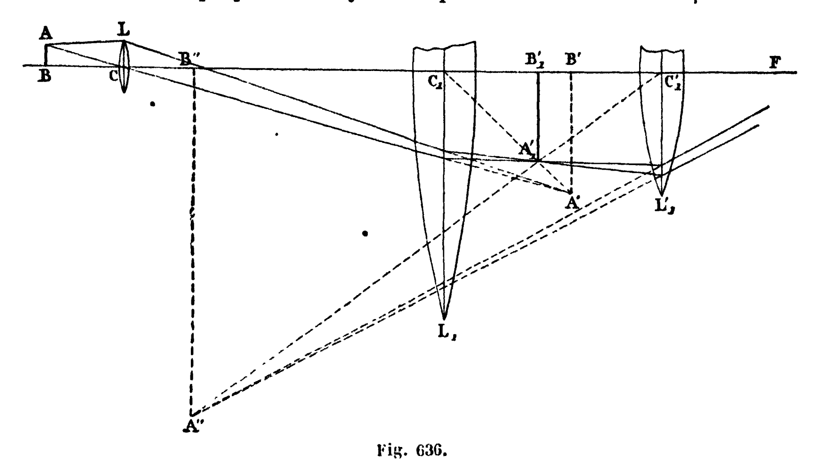


Fig. 636.

tille L_1, a une distance focale triple de celle de la loupe et son diamètre est pour cette raison plus grand.

Un oculaire négatif, employé seul, ne peut pas fonctionner comme loupe.

Cercle oculaire. — Tout rayon qui a traversé l'objectif peut être supposé partir de sa surface; s'il traverse aussi l'oculaire, il passe par le *cercle oculaire,* image de l'objectif donnée par l'oculaire.

Après leur sortie de l'oculaire, tous les rayons qui ont traversé l'objectif se croisent sur le cercle oculaire; sa position est précisée par une plaque percée d'une ouverture appelée *œilleton;* placé là, l'œil embrasse tout le champ du microscope. Le petit diamètre de l'objectif et la courte distance focale de l'oculaire rendent le cercle oculaire plus petit que l'ouverture de la pupille.

Les microscopes sont employés pour les études botaniques et histologiques, pour les déterminations bactériologiques, minéralogiques, pétrographiques, etc.

Microphotographie. — Si l'on recule convenablement l'oculaire, un microscope donne une image réelle que l'on reçoit dans une chambre noire sur un verre dépoli. Après la mise au point (**550**), on substitue au verre dépoli une plaque photographique sensible.

Ultramicroscope. — De même que nous percevons la nuit une étoile sur un fond obscur, nous pouvons distinguer de fines particules disséminées dans un liquide si elles sont éclairées par un faisceau lumineux intense qui les illumine sans nous atteindre; les particules se projettent sur un fond sombre. L'ultramicroscope réalise ces conditions.

Sur la platine d'un microscope ordinaire est posé un bloc parallélépipédique de verre ABDE, à base rectangle, d'une épaisseur d'environ un

centimètre ; les faces obliques font avec la base un angle de 51° (fig. 636 *bis*). Sur le bloc on applique la lame porte-objet P, puis au dessus une gouttelette de la *préparation*, c'est-à-dire du liquide qui tient en suspension les particules à observer; la goutte est surmontée d'une lamelle couvre-objet C. Entre le bloc de verre et le porte-objet est interposée une goutte liquide de même indice que le liquide de la préparation.

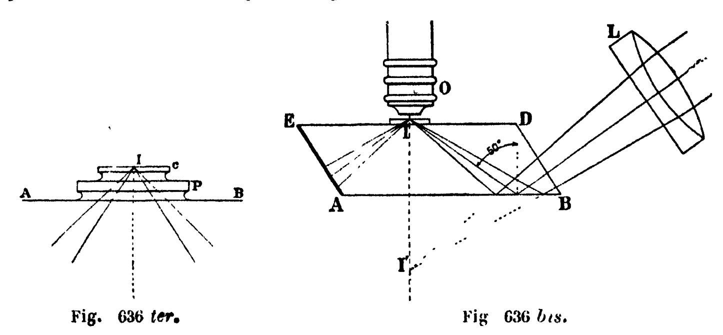


Fig. 636 *ter*. Fig 636 *bis*.

Sur la face latérale BD on fait arriver normalement un faisceau convergent d'un arc électrique. Ce faisceau se réfléchit totalement sur la face inférieure AB du bloc, traverse les différents milieux et donne dans la préparation, au-dessous du couvre-objet, un point de convergence, I, réel, très brillant (fig. 636 *ter*). Les rayons sont ensuite réfléchis totalement, contre l'air, sur la face supérieure du couvre-objet et ils vont rencontrer la face AE du bloc de verre qui est noircie et les absorbe.

La seule lumière qui pénètre dans l'objectif O est celle que disséminent les particules illuminées, en suspension dans le liquide; chacune se révèle par *un point brillant sur un fond noir*. Leur *existence* est simplement révélée, sans que leur forme puisse être appréciée.

Les plus petites dimensions des corpuscules *ultramicroscopiques* ainsi observées s'abaissent jusqu'à 3 millièmes de micron.

LUNETTE ASTRONOMIQUE

544. Les lunettes servent à l'observation d'objets éloignés.

La lunette astronomique, employée pour l'observation des astres, est formée des mêmes éléments que le microscope : un objectif et un oculaire, tous deux convergents et *ayant même axe principal*. L'*objectif* L a une large surface et un long foyer, il est achromatique. A cause de l'éloignement des objets, il donne, à son foyer principal F, une image A'B', réelle et renversée d'un astre AB. L'*oculaire* L', à court foyer, est pour cela d'un diamètre beaucoup plus petit que l'objectif, il fonctionne comme une loupe et fournit, de

(1) Avec une loupe simple, le cercle oculaire est sensiblement au foyer de l'oculaire.

l'image A′B′, une image **virtuelle** et **agrandie** A″B″. Cette nouvelle

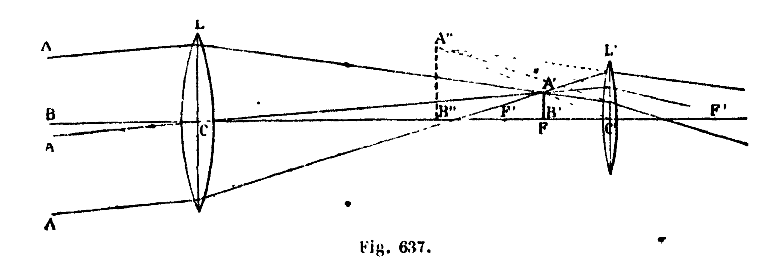


Fig. 637.

image est droite par rapport à la première image et **renversée** par rapport à l'objet (fig. 637).

La monture de l'objectif se visse à l'extrémité d'un large tube cylindrique de laiton (fig. 642); à l'autre extrémité de ce tube glisse à frottement un autre tube plus étroit qui porte l'oculaire.

Construction des images. — L'objet est assez éloigné pour que les rayons émanant de chacun de ses points soient parallèles. Il est représenté par l'angle ACB de ses axes secondaires extrêmes. Les intersections de ces axes avec le plan focal limitent l'image A′B′.

Marche des rayons. — Un point A de l'objet envoie sur l'objectif L un cône de rayons qui donne, après réfraction, un nouveau faisceau conique qui converge en A′, sur l'axe secondaire AC. Ce faisceau diverge ensuite de A′, rencontre l'oculaire L′, et, après réfraction, semble diverger d'un point A″ situé sur l'axe secondaire A′C′.

Mise au point. — L'image A″B″ doit être observée à la distance minimum de la vision distincte. L'objet étant très éloigné, son image se forme à une distance fixe de l'objectif, en F, et, pour la mise au point, on déplace l'oculaire seul par rapport à l'objectif.

Un myope *enfonce* l'oculaire pour le rapprocher de l'image A′B′.

Grossissement. — Le grossissement est le ***rapport du diamètre apparent*** ω' ***d'un astre, vu dans la lunette, au diamètre apparent*** ω ***du même astre, vu à l'œil nu.***

Pour la vision à travers la lunette, nous supposerons confondus le centre optique de l'œil et le centre optique de l'oculaire. Pour la vision directe, à cause de l'éloignement, le centre optique de l'œil peut être supposé au centre optique de l'objectif. De là A′B′ $= \omega$ F.

ϖ étant la puissance de l'oculaire, l'angle ω' sous lequel on voit l'image définitive est A′B′.ϖ ou ω F. ϖ.

$$\text{De là} \quad \frac{\omega'}{\omega} = G = \varpi F = \left(\frac{1}{\Delta} + \frac{1}{f}\right) F.$$

$G = \varpi F$ est sensiblement égal à $\frac{F}{f}$, car $\frac{F}{\Delta}$ est négligeable par rapport à $\frac{F}{f}$, à cause de la petitesse de f.

L'expression $\frac{F}{f}$, indépendante de la vue de l'observateur, caractérise l'instrument. Le grossissement est proportionnel à la distance focale de l'objectif et en raison inverse de la distance focale de l'oculaire. Les aberrations ne permettant pas d'employer des oculaires très convergents, on prend des objectifs à long foyer, ce qui allonge l'instrument. Le diamètre de l'objectif croît avec sa distance focale, ce qui admet beaucoup de lumière et augmente l'éclat de l'image.

Mesure expérimentale du grossissement. — Le grossissement est égal au *rapport des diamètres de l'objectif et du cercle oculaire.*

Soit R le rayon de l'objectif, r le rayon du cercle oculaire. La

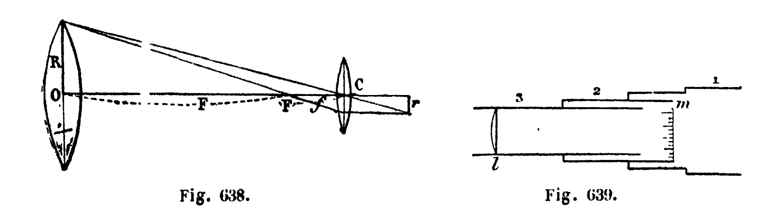


Fig. 638. Fig. 639.

lunette étant réglée pour l'infini et pour une vue très longue, on a : $OC = F + f$. Construisons le cercle oculaire ou l'image r de R à travers l'oculaire, en menant 1° l'axe secondaire de l'extrémité de l'objectif, 2° un rayon issu de ce point qui passe par le foyer de l'oculaire et sort parallèlement à l'axe (fig. 638). De la similitude des deux triangles rectangles qui ont en F un angle aigu opposé par le sommet on déduit : $\frac{R}{r} = \frac{F}{f}$.

On reçoit le cercle oculaire sur un micromètre m divisé en dixièmes de millimètre que l'on regarde avec une loupe l ; le nombre de divisions couvertes par le cercle oculaire représente $2r$ (fig. 639).

On ouvre d'autre part sur l'objectif les pointes d'un compas jusqu'à ce que leurs images limitent un diamètre de l'anneau oculaire. Les deux pointes portées sur une règle divisée donnent le diamètre 2R de la partie de l'objectif dont l'image forme l'anneau oculaire.

Pouvoir séparateur. — Le pouvoir séparateur dans une lunette astronomique est la distance angulaire ε sous laquelle apparaîtraient à l'œil nu deux étoiles qui commencent à être séparées par la lunette, quand le grossissement oculaire est suffisant.

Pour déterminer directement le pouvoir séparateur d'une lunette, on vise à une grande distance l de l'objectif, par exemple à 500 mètres, un carton portant plusieurs *mires* composées chacune de traits noirs parallèles, équidistants, où l'épaisseur du trait est égale à l'intervalle de deux traits consécutifs. Plus espacés sur la première mire, les traits se serrent de plus en plus sur les suivantes. Le pouvoir séparateur est l'*angle* ε sous lequel on verrait directement, à la distance l, l'intervalle a de deux traits consécutifs sur la mire la plus serrée dont les traits restent distincts. Sa valeur est $\frac{a}{l}$ radian ou $\frac{a}{l}\,\frac{360.60.60}{2\pi}$ secondes.

Clarté. — La clarté est le *rapport des éclairements* des images rétiniennes obtenues à travers la lunette et à l'œil nu.

Appelons Q la quantité de lumière envoyée normalement sur l'unité de surface, R le rayon de l'objectif ; l'objectif de la lunette, dirigé vers l'astre, est traversé par la quantité de lumière $\pi R^2 Q$. Pour une lunette puissante, le rayon p de la pupille est supérieur au rayon r du cercle oculaire et la rétine reçoit toute la lumière qui a traversé l'objectif. A l'œil nu, la quantité de lumière reçue par la rétine est $\pi p^2 Q$.

1° *Objet à diamètre apparent sensible* (soleil, planètes). *Il y a grossissement* et la lumière $\pi R^2 Q$, transmise par l'objectif, se répartit sur une image rétinienne de surface S.

L'œil nu reçoit une quantité de lumière $\pi p^2 Q$ qui se répartit sur une image rétinienne de surface s, les éclairements des deux images sont $\frac{\pi R^2 Q}{S}$ et $\frac{\pi p^2 Q}{s}$. La clarté est $C = \frac{R^2}{p^2}\,\frac{s}{S}$. Le rapport $\frac{S}{s}$ des images rétiniennes étant le grossissement superficiel de la lunette ou le carré G^2 du grossissement linéaire,

$$C = \frac{R^2}{p^2}\cdot\frac{1}{G^2}, \text{ comme } \frac{1}{G^2} = \frac{r^2}{R^2}, \text{ on a } C = \frac{r^2}{p^2}.$$

Or $r < p$: l'éclat de l'image est inférieur à celui de l'objet vu à l'œil nu.

2° *Objet sans diamètre apparent* (étoile). *Il n'y a pas grossissement ;* la lumière reçue par la rétine occupe toujours un simple point. La clarté C est alors le rapport des quantités de lumière reçues ou $\frac{R^2}{p^2}$. L'éclat de l'astre est notablement augmenté et la lunette permet d'observer des étoiles invisibles à l'œil nu (1).

Champ. — Comme dans le microscope, le champ est l'angle des axes secondaires menés du centre de l'objectif sur le contour de l'oculaire.

Pour n'avoir que des images uniformément éclairées, la lunette est

(1) L'ordre de grandeur d'une étoile se rapporte à son éclat. Quel que soit son classement dans l'ordre des grandeurs, une étoile *reste sans diamètre apparent dans une lunette;* mais, dans la lunette, la portion du ciel qui entoure l'étoile est un objet qui a un diamètre apparent et dont la clarté décroît lorsque le grossissement augmente. Aussi, en plein jour, avec une forte lunette ou un puissant télescope les étoiles des premières grandeurs peuvent être distinguées sur le fond relativement sombre du ciel.

munie d'un *diaphragme* qui se place dans le plan focal de l'objectif et intercepte les faisceaux qui ne rencontreraient que partiellement l'oculaire.

En menant, dans un plan qui passe par l'axe CC′, une droite GH qui

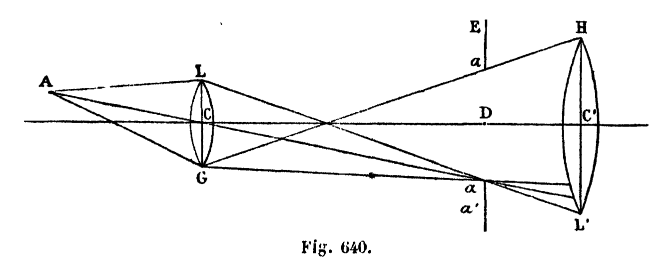


Fig. 640.

va du bord inférieur de l'objectif au bord supérieur de l'oculaire, le point α où cette droite rencontre le plan focal limite l'ouverture du diaphragme. D'après le tracé, le faisceau d'axe secondaire Cα rencontre en entier l'oculaire et c'est un axe secondaire extrême, car tout autre, tel que Cα′, plus écarté, est l'axe d'un faisceau qui ne rencontre l'oculaire que partiellement.

Le champ *de pleine lumière* est un cône opposé à celui qui a pour sommet le centre optique C de l'objectif et pour base l'ouverture du diaphragme, qui est une circonférence de rayon Dα.

Le champ est *approximativement* $\frac{2\rho}{F+f}$ (ρ rayon de l'oculaire) ou $\frac{2\rho}{F}$.

Réticule. — Le réticule est formé de deux fils très fins tendus en croix dans le plan focal [1] de l'objectif (fig. 641). L'image et le réticule sont vus distinctement en même temps. L'image paraît coupée par une fine croix noire.

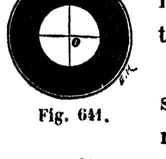


Fig. 641.

Axe optique. — Une lunette astronomique sert non seulement à observer des objets éloignés, mais aussi à repérer leur direction. La ligne de visée est l'*axe optique,* ligne joignant le centre de l'objectif au point de croisement *o* des fils du réticule. En déplaçant, s'il y a lieu, ce point de croisement, on fait coïncider l'*axe optique* avec l'*axe géométrique* de l'instrument. On vise une étoile, en amenant son image à se former au point de croisement *o* ; l'axe optique coïncide alors avec l'axe secondaire de l'étoile. Dans la visée d'une deuxième étoile, on fait coïncider à son tour, avec l'axe optique, l'axe secondaire de la deuxième étoile. Le déplacement angulaire de l'axe géométrique de la lunette dans les deux visées, mesuré sur un cercle divisé, donne l'*angle des axes secondaires* des deux astres.

(1) Les fils sont tendus sur le diaphragme : on déplace l'oculaire de manière à voir distinctement les bords du diaphragme. Puis, en déplaçant ensemble le diaphragme et l'oculaire on amène le diaphragme et le réticule dans le plan de l'image.

Chercheur. — On accroît le grossissement d'une lunette astronomique en augmentant F et en diminuant f. En diminuant f, on diminue nécessairement le diamètre de l'oculaire (1). L'augmentation de F et la diminution du diamètre de l'oculaire réduisent l'angle du cône qui a pour sommet le centre de l'objectif et s'appuie sur l'oculaire. *Le champ devenant très petit pour un fort grossissement*, il est difficile d'amener un astre dans le champ de l'instrument. La lunette astronomique est alors munie d'un *chercheur* C, petite lunette à réticule, de faible grossissement et de champ étendu (fig. 642). Le chercheur permet de distinguer un astre par ses relations de position avec les astres voisins; on le vise et on amène son image a

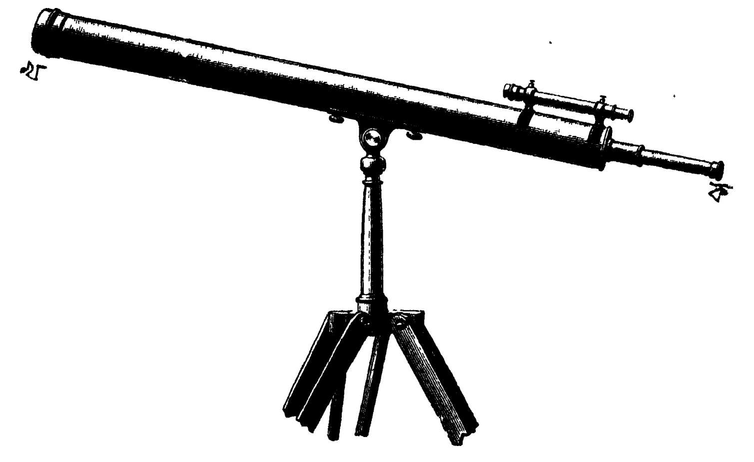


Fig. 642.

centre du réticule du chercheur. Un réglage préalable ayant établi le parallélisme des axes optiques de la grande lunette et du chercheur, l'astre se trouvera sensiblement au centre du réticule de la grande lunette; un petit mouvement de la lunette l'y amènera exactement.

Position de l'œil. — Les rayons qui ont traversé à la fois l'objectif et l'oculaire passent par le cercle oculaire; dans ce plan, les faisceaux qui ont traversé l'objectif présentent la plus petite section par un plan perpendiculaire à l'axe. Avec les lunettes de fort grossissement, l'ouverture de la pupille est plus grande que le cercle oculaire, et l'œil placé au cercle oculaire embrasse tout le champ de l'instrument. Le tube porte-oculaire se termine, au delà de l'oculaire, par un *œilleton* situé dans le plan du cercle oculaire, et contre lequel on applique l'œil. L'œilleton est *au foyer* de l'oculaire, l'objectif étant très éloigné de l'oculaire.

La lunette astronomique est l'organe essentiel d'instruments

(1) Pour que les aberrations de sphéricité ne soient pas trop fortes, le diamètre d'une lentille ne dépasse pas la moitié de la distance focale.

L'angle du champ $\frac{2\rho}{F} = \frac{2\rho}{f} \cdot \frac{f}{F} = \frac{2\rho}{fG}$; comme $\frac{\rho}{f}$ est constant, le champ varie en raison inverse du grossissement.

astronomiques (lunette méridienne, équatorial) et d'instruments de géodésie et d'arpentage où l'on vise à grande distance (théodolites, niveaux, etc...).

545. Lunettes viseurs. — On se sert souvent de lunettes construites comme la lunette astronomique, mais d'un plus faible grossissement. Les images se forment à des distances variables de l'objectif, suivant la position de l'objet; l'ensemble du diaphragme et de l'oculaire est porté par un tube qu'on déplace avec une crémaillère. L'oculaire est mobile dans ce dernier tube.

Pour déterminer le *grossissement*, on adapte, à l'aide des vis v (fig. 643), une chambre claire à la lunette L et on compare à une

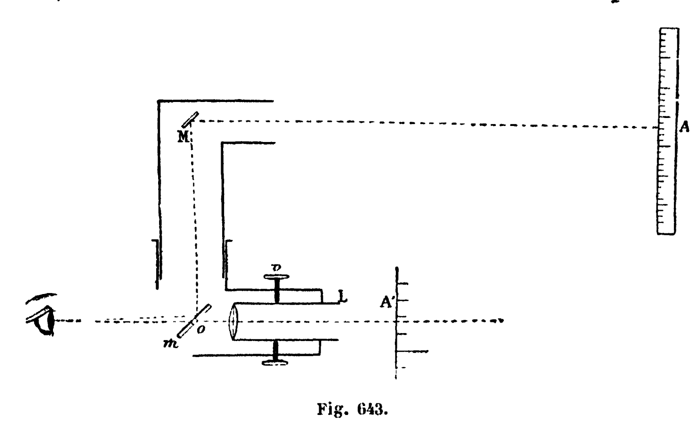


Fig. 643.

mire divisée A, vue directement, l'image A′ de cette mire, vue à travers la lunette. La mire est vue, après deux réflexions en M et en *m*, sur les deux miroirs parallèles de la chambre claire, en même temps que son *image* à travers la lunette. Une division amplifiée recouvrant N divisions vues directement, $\omega' = N\omega$ et $G = N$.

546. Lunette terrestre. — Les images données par la lunette astronomique sont renversées : cela est indifférent en astronomie.

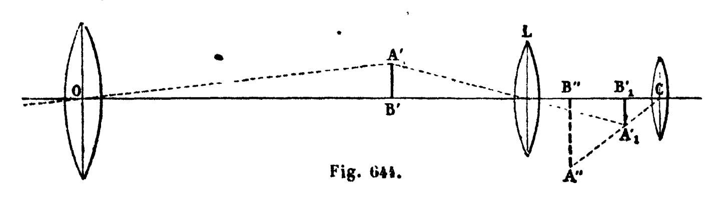


Fig. 644.

Pour l'observation des objets terrestres, on redresse l'image A'B donnée par l'objectif. Une seule lentille L, de distance focale φ, suffirait; en la plaçant à une distance 2φ de l'image réelle A′B′, une image

redressée $A'_1B'_1$, égale à A'B', se formerait de l'autre côté de la lentille L, à la même distance 2φ et $A'_1B'_1$ serait observé avec l'oculaire. La longueur de la lunette est ainsi accrue de 4φ (fig. 644).

Avec ce système redresseur, le grossissement est $F\left(\frac{1}{\Delta}+\frac{1}{f}\right)$, comme avec une lunette astronomique de même objectif et de même oculaire.

Cette solution allongeant trop la lunette, on dispose une première len-

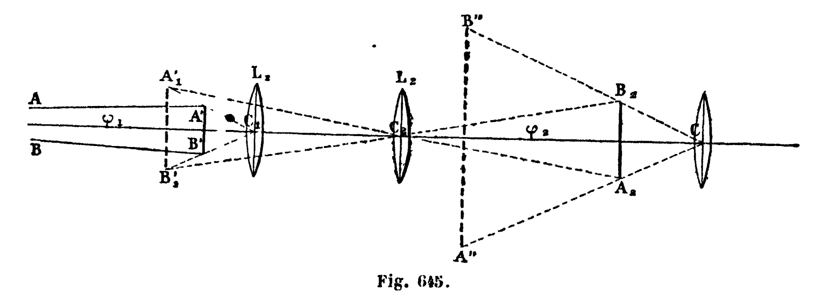


Fig. 645.

tille L_1, de distance focale φ_1, à une distance de A'B' inférieure à φ_1, elle donne une image virtuelle, agrandie $A'_1B'_1$, encore renversée; une lentille L_2, de distance focale φ_2, est placée à une distance de $A'_1B'_1$ assez grande pour en donner une image A_2B_2 réelle et renversée, redressée par rapport à A'B'. L'image A_2B_2 est observée avec l'oculaire, qui donne l'image virtuelle A''B'' (fig. 645).

$$G=\frac{A''CB''}{A'OB'}=\frac{\dfrac{A_2B_2}{p}}{\dfrac{A'B'}{F}}=\frac{A_2B_2}{A'B'}\cdot\frac{F}{p}\quad\text{ou}\quad\frac{A_2B_2}{A'B'}\,F\left(\frac{1}{\Delta}+\frac{1}{f}\right).$$

547. Lunette de Galilée. — La lunette terrestre est plus longue qu'une lunette astronomique de même grossissement; en outre, des pertes de lumière ont lieu par réflexion à la surface des lentilles du système redresseur. Dans la lunette de Galilée, le redressement est réalisé avec un *oculaire divergent.*

Construction des images. — La lunette de Galilée comprend un objectif achromatique à long foyer L et un oculaire L', montés aux

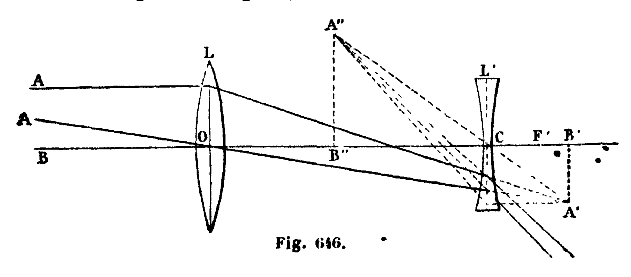


Fig. 646.

deux extrémités d'un tube métallique; les axes principaux des deux lentilles coïncident. L'objectif donnerait en A'B' une image réelle et renversée d'un objet AB, si les rayons qui convergent en A'B' ne rencontraient pas la lentille divergente L' (fig. 646).

La lentille divergente reçoit des rayons convergents (**494**), elle donne une image *virtuelle* si A'B' tend à se former au delà du deuxième foyer F'. En rapprochant la lentille divergente de l'objectif, on obtient une image virtuelle A''B'', agrandie et redressée.

Marche des rayons. — Un faisceau issu d'un point A éloigné est parallèle à l'axe secondaire AO; il est convergent après sa réfraction à travers l'objectif L; le sommet du cône réfracté serait A' sans l'oculaire L'; l'oculaire réfracte le faisceau et le rend divergent; le sommet virtuel des rayons prolongés est derrière la lentille en A''.

Mise au point. — L'objet virtuel A'B' est très voisin du deuxième foyer F', si A''B'' doit se faire loin de la lentille divergente; pour que A''B'' se rapproche, A'B' doit être éloigné du foyer. Un myope *enfonce* donc l'oculaire, comme dans une lunette astronomique.

Grossissement. — Le grossissement est le rapport $\frac{\omega'}{\omega}$ des diamètres apparents de l'image et de l'objet.

$$\omega' = \varpi . A'B' = \varpi . \omega F. \qquad G = \frac{\omega'}{\omega} = \varpi F.$$

ϖ est la puissance de l'oculaire. $\qquad G = F\left(\frac{1}{f} - \frac{1}{\Delta}\right)$ (1).

Le grossissement pour un objet très éloigné et une vue infiniment longue est $\frac{F}{f}$ (2). Le grossissement se mesure, pour la lunette terrestre et pour la lunette de Galilée, comme pour une lunette viseur.

Absence de réticule. — L'image donnée par l'objectif ne se forme pas, et ne peut pas être reçue sur un réticule. N'ayant pas d'axe optique, la lunette de Galilée ne permet pas de mesurer l'angle de deux directions.

Les jumelles de théâtre, les jumelles marines se composent de deux lunettes de Galilée parallèles, pour la vision binoculaire. Pour ne pas trop réduire le champ, leur grossissement est faible.

---

(1) L'équation aux foyers conjugués de l'oculaire divergent est ici, en prenant $OB' = p$,

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{\Delta} = \frac{1}{f} \quad \text{d'où} \quad \frac{1}{p} = \frac{1}{f} - \frac{1}{\Delta}. \quad \text{Or } \varpi = \frac{1}{p}.$$

(2) La longueur de la lunette de Galilée ajustée pour ces conditions limites est $F - f$, tandis que la longueur de la lunette astronomique est $F + f$.

Le grossissement limite est égal, dans la lunette de Galilée, au rapport des rayons de l'objectif et du cercle oculaire; mais le cercle oculaire (image de l'objectif à travers l'oculaire) est virtuel, compris entre l'oculaire et son foyer principal et il n'est pas possible de mesurer directement son rayon.

TÉLESCOPE DE NEWTON

548. Un télescope est formé d'un **miroir concave** et d'un **oculaire.**

Construction des images. — Dans le télescope de Newton, un **miroir sphérique concave** M est fixé au fond d'un tube noirci T,

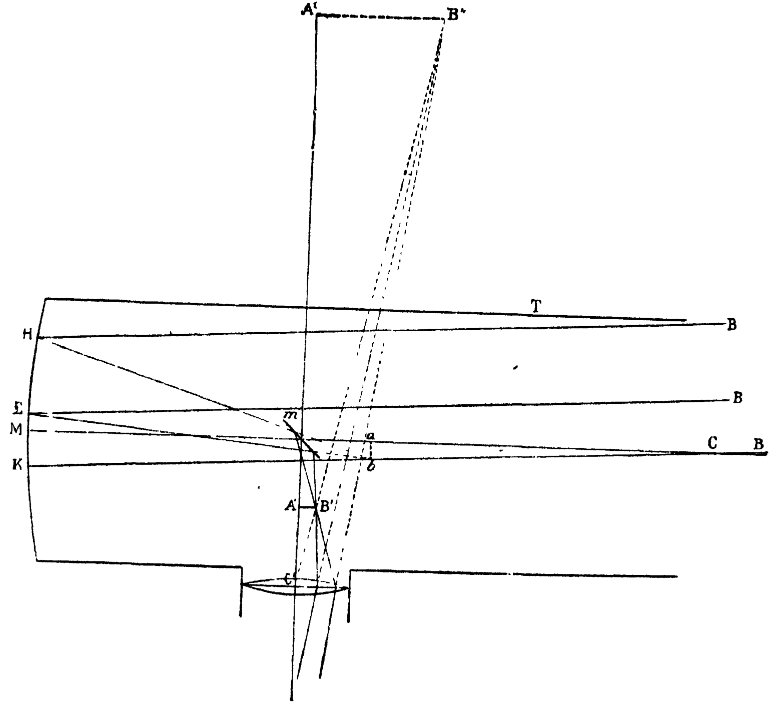


Fig. 647.

ouvert par l'autre extrémité, et dirigé vers les objets observés (fig. 647). Les rayons d'un objet éloigné AB, réfléchis par M, formeraient une image *réelle* et *renversée ab,* entre le centre C et le foyer principal, très près du foyer. Sur le trajet des rayons réfléchis *convergents,* entre le miroir concave et son foyer principal, est interposé un **miroir plan** *m,* incliné à 45°, qui donne en A'B', une image *réelle* et *symétrique* de *ab* par rapport au miroir. Le miroir plan *m* est ordinairement remplacé par la face hypoténuse d'un prisme rectangle isocèle à *réflexion totale.* L'image réelle A'B', observée avec un **oculaire** C', fournit une image *virtuelle* et *agrandie* A'' B'' ; le point B'' se trouve sur l'axe secondaire B'C'.

Marche des rayons. — Les rayons issus d'un point éloigné situé

sur un axe secondaire bC forment un faisceau BHBE de rayons parallèles à cet axe secondaire ; par la réflexion sur le miroir concave, ce faisceau cylindrique est transformé en un faisceau conique de sommet b dans le plan focal principal. Ce faisceau, divergent au delà de b, pourrait être observé directement ou par un oculaire ; le miroir plan m reçoit les rayons convergents avant leur réunion en b et les fait concourir, après réflexion, au point B′. Le faisceau divergent issu de B′, tombe sur l'oculaire et, après réfraction, vient de B″.

Mise au point. — Pour que A″B″ soit vu à la distance minimum de la vision distincte, l'image fixe A′B′ doit être située entre le foyer de l'oculaire et l'oculaire ; un myope doit *enfoncer* l'oculaire.

Grossissement. — Pour la vision directe, le centre optique de l'œil est supposé au centre du miroir concave.

Soit ω' l'angle sous lequel on voit l'image définitive ; l'angle ω' est égal à $A'B'.\varpi$ ou $\varpi.\omega F$.

$$\text{de là}\quad \frac{\omega'}{\omega} = G = \varpi F = F\left(\frac{1}{\Delta} + \frac{1}{f}\right).$$

Comme pour la lunette astronomique, le grossissement limite est $\frac{F}{f}$ (pour un objet infiniment éloigné et une vue infiniment longue).

Cercle oculaire. — Supprimant le miroir plan m, nous supposerons l'oculaire au delà de l'image réelle ab.

Le cercle oculaire est l'image du miroir concave à travers l'oculaire. R étant le rayon de base du miroir, r le rayon du cercle oculaire, $\frac{F}{f} = \frac{R}{r}$; le calcul se fait comme pour la lunette astronomique. L'œil, placé au cercle oculaire, reçoit tous les rayons réfléchis par le miroir.

Champ. — Le champ est l'angle d'un cône qui a pour sommet le centre de courbure du miroir concave et pour base un diaphragme placé dans le plan focal. Le diaphragme intercepte les faisceaux qui ne rencontreraient que partiellement l'oculaire. Un réticule est tendu dans le plan du diaphragme. L'axe optique du télescope est la ligne qui joint le centre O du miroir au point de croisement des fils du réticule.

Un accroissement du grossissement $\frac{F}{f}$ entraînant une diminution du champ, on fait usage d'un *chercheur*, dont l'axe optique est parallèle à celui du télescope.

Avantages des télescopes. — Les images des télescopes, obtenues par réflexion, sont *exemptes d'aberration de réfrangibilité ;* on leur a pourtant longtemps préféré les lunettes chez lesquelles la perte de lumière, par transmission à travers l'objectif, était plus faible. Les miroirs en bronze des télescopes n'avaient en effet qu'un pouvoir réflecteur de 0,6 environ et leur poli s'altérait à l'air. On

les a remplacés par des miroirs en verre *argentés* sur leur surface concave, plus légers et dont le pouvoir réflecteur atteint 0,95, ce qui rend les images du télescope aussi claires que celles de la lunette astronomique. Quand la surface argentée a été ternie, un nouveau polissage n'est pas nécessaire comme avec un miroir de bronze; après avoir dissous la couche d'argent, on en dépose une autre sur le verre sans qu'un polissage modifie la surface.

Dans le télescope, l'*aberration de sphéricité* est annulée pour les rayons parallèles à l'axe par l'emploi d'une surface parabolique qui les concentre exactement en son foyer. Dans ces conditions, les télescopes sont souvent employés pour l'observation des astres.

Un télescope ne sert pas aux *observations solaires,* car un miroir subit par la chaleur des déformations qui troublent les images.

549. Télégraphie optique. — On installe à une station de

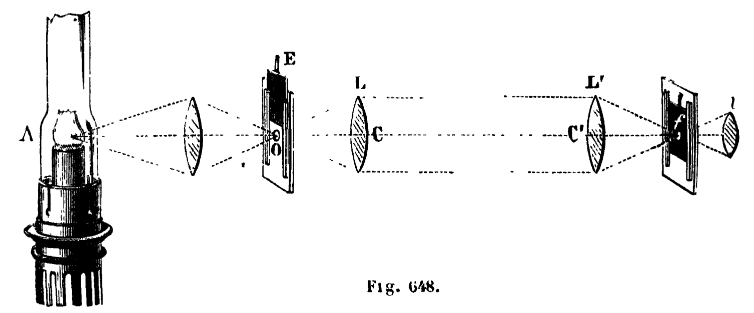


Fig. 648.

départ (fig. 648) un collimateur OL qui envoie un faisceau cylindrique de lumière. Ce faisceau est observé, à la station d'arrivée, au foyer f d'une lunette L'. On concentre avec une lentille sur l'ouverture circulaire O d'un écran les rayons d'une lampe A. Le faisceau conique qui part de O est rendu cylindrique par la lentille L. L'axe du faisceau de départ est l'*axe* OC *du collimateur;* il *coïncide* avec l'*axe* C'f *de la lunette* réceptrice (**439**). Par un obturateur E qu'on manœuvre avec un levier, on découvre l'ouverture de manière à faire voir au foyer f de la lunette L' des éclairs longs ou brefs reproduisant les signaux Morse.

PHOTOGRAPHIE

La **photographie** reproduit et fixe l'image des objets.

Elle repose sur la propriété que possède la lumière de décom-

poser certains sels, tels que le chlorure et le bromure d'argent.

La pratique photographique comprend trois opérations : 1° formation d'une image ; 2° production d'une **épreuve négative** (cliché), où les parties claires de l'image sont devenues noires et inversement ; 3° production d'**épreuves positives**, où les clairs et les ombres reprennent leur ordre naturel.

I. FORMATION DE L'IMAGE

550. Appareil photographique. — Un appareil photographique se compose d'une chambre noire (fig. 649), munie d'une lentille convergente ou objectif O enchassé dans une ouverture du volet. Le fond mobile D de la chambre est un écran translucide en verre dépoli. L'objectif est achromatisé pour que le foyer des rayons violets coïncide avec le foyer des rayons jaunes (radiation chimique K et radiation lumineuse D). Les parois latérales de la chambre sont disposées en soufflet S, ce qui donne de la légèreté et permet un tirage étendu.

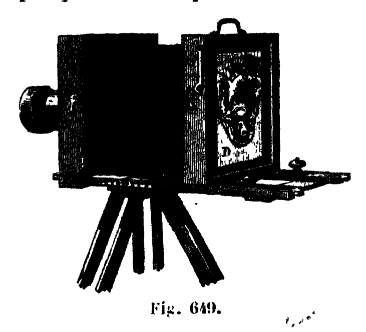


Fig. 649.

Mise au point. — Le photographe, placé derrière le verre dépoli, dirige l'axe principal de l'objectif vers le centre de l'objet à reproduire ; puis, en déplaçant le fond mobile de la chambre noire, il avance ou recule le verre dépoli jusqu'à ce que la netteté de l'image renversée soit maximum (le verre dépoli se trouve alors dans le plan conjugué de l'objet par rapport à l'objectif).

II. ÉPREUVE NÉGATIVE.

551. La *mise au point* ayant été effectuée avec soin, l'image réelle fournie par l'objectif doit impressionner une plaque sensible. On recouvre l'objectif avec un obturateur, et on substitue à l'écran dépoli une plaque de verre ou une pellicule chimiquement sensible, placée dans une boîte plate opaque, appelée *châssis*. Le côté sensible est tourné vers l'objectif, il est protégé contre la lumière par un volet mobile.

La plaque de verre ne sert que de support ; la substance sensible déposée sur elle est du bromure d'argent tenu en suspension dans

une substance visqueuse, la gélatine. Cette émulsion de gélatino-bromure d'argent est attaquée par les rayons lumineux auxquels on l'expose, sauf par les rayons rouges (1).

Pose. — On soulève verticalement le volet qui recouvre la plaque sensible et on ouvre l'obturateur. Dans les parties éclairées de l'image, la lumière met en liberté le métal du sel d'argent; dans les demi-teintes, l'action est moins vive; elle est nulle dans les ombres. Après un *temps de pose* suffisant, on bouche l'objectif avec son obturateur, et on rabat sur la plaque sensible le volet du châssis. Avec des plaques extra rapides, la durée de pose peut être abaissée à quelques millièmes de seconde.

Développement de l'image. — La plaque, enfermée dans son châssis, est emportée dans une salle qui n'est éclairée que par de la lumière rouge; là on sort la plaque; *rien n'est encore apparent.* On emploie alors, pour *développer* l'image, des substances réductrices énergiques, telles que des solutions d'oxalate de protoxyde de fer ou d'acide pyrogallique ou d'hydroquinone qui continuent la réduction du sel d'argent aux points impressionnés. La liqueur *révélatrice* ayant été versée dans une cuvette, on y plonge la plaque, la gélatine regardant en haut. Le dépôt d'argent divisé, formé sur les parties éclairées par le modèle, noircit progressivement, les noirs restent blancs. C'est l'*épreuve négative.*

Fixage. — Si on exposait alors la plaque à la lumière, le bromure d'argent resté intact noircirait. Il faut donc supprimer la sensibilité de la plaque à toute action lumineuse ultérieure, cela s'appelle *fixer* l'image. A cet effet, après avoir lavé la plaque pour arrêter l'action du révélateur, et avant de la sortir de la salle obscure, on dissout le sel d'argent resté intact avec une solution d'*hyposulfite de sodium,* ce qui rend définitivement transparentes les parties de l'épreuve où la lumière n'a pas agi. Le bromure réduit ne se dissout pas dans l'hyposulfite. On *lave* la plaque pour éliminer l'hyposulfite et on la laisse sécher sur un égouttoir.

Cliché négatif. — L'épreuve sur verre laisse passer par transparence la lumière dans les parties de la plaque qui correspondent aux régions noires de l'objet; les parties correspondantes aux blancs sont *noires,* étant recouvertes d'argent réduit.

---

(1) Les plaques au gélatino-bromure d'argent sont conservées à l'abri de la lumière. Les sels d'argent sont décomposés directement par les rayons bleus, violets, ultra-violets; on peut les rendre sensibles aux autres couleurs qui d'ordinaire agissent très peu : vert, jaune, orangé, en leur ajoutant des substances dites *sensibilisatrices.*

Le négatif va servir, comme un *cliché,* à tirer des épreuves *positives,* sans qu'on ait besoin de faire poser de nouveau le modèle.

III. ÉPREUVES POSITIVES

552. *Les* **positifs** *se tirent ordinairement sur papier.* — Dans un châssis-presse dont le fond est en verre, on place l'épreuve négative et, au dessus, une feuille de papier qui a été imprégnée de chlorure d'argent dans l'obscurité (dite *sensibilisée* au chlorure d'argent); le côté sensibilisé est appliqué sur la couche impressionnée du cliché; puis, on expose le fond en verre du chassis à la lumière du jour. La lumière traverse le cliché dans ses parties transparentes et noircit en ces points le papier chloruré; le papier reste blanc sous les régions du négatif rendues opaques par l'argent réduit. Après une action suffisante de la lumière (quand le positif est *bien venu*), on suspend l'exposition puis on lave l'épreuve positive avec une solution d'hyposulfite de sodium qui *fixe* l'image en dissolvant le chlorure d'argent non réduit.

Dans l'épreuve définitive obtenue, les tons sont renversés par rapport au négatif, et l'objet est reproduit, *sauf la coloration.*

L'épreuve positive est longuement lavée pour enlever toute trace d'hyposulfite, puis séchée. La formation d'épreuves positives peut être indéfiniment répétée avec le même cliché.

Virage. — On appelle *virage* un changement de teinte de l'image. En plongeant l'épreuve positive dans du chlorure d'or ou de platine, on remplace le dépôt brun d'argent par un dépôt noir qui est violacé avec l'or et qui est noir de charbon avec le platine.

Épreuves positives au charbon. — On ne peut assurer une conservation indéfinie aux épreuves positives aux sels d'argent. Le procédé au charbon, fondé sur une propriété de la gélatine bichromatée, fournit des *épreuves inaltérables.*

Une *couche de gélatine, mélangée à du bichromate de potassium,* acquiert sous l'influence de la lumière, la propriété de devenir insoluble dans l'eau chaude sous une épaisseur d'autant plus grande que l'action de la lumière a été plus prolongée.

Pour tirer une épreuve positive au charbon, on expose à la lumière, sous un négatif obtenu à la façon ordinaire, une feuille de papier blanc qui a été d'abord couverte d'une couche de gélatine imprégnée de bichromate de potassium mélangé avec du noir de fumée, puis séchée.

Après un temps convenable d'exposition à la lumière, on plonge la feuille bichromatée dans un bain d'eau chaude. La gélatine se dissout aux points où elle a été préservée de la lumière par les parties noires

du cliché négatif et elle entraîne avec elle le charbon qui lui a été incorporé; en ces points, le papier redevient blanc. Après le lavage, la couche de gélatine bichromatée conserve des épaisseurs plus grandes sous les parties plus transparentes du cliché. L'épreuve présente les mêmes différences de tons que l'objet photographié.

Tirage mécanique d'épreuves positives. — Les épreuves au charbon sont des images *en relief;* les reliefs correspondent aux noirs, les creux aux parties brillantes. Elles permettent de reproduire à la presse un grand nombre d'exemplaires sans que la lumière ait de nouveau à intervenir (1).

CHRONOPHOTOGRAPHIE

553. La *chronophotographie* a pour objet l'étude de mouvements rapides dont on reproduit les phases successives à l'aide de *photographies instantanées.* Une série d'épreuves donne, à de courts intervalles de temps, les positions successives de l'objet en mouvement.

Analyse du mouvement. — L'objet à étudier est vivement éclairé d'une façon continue; sa lumière est admise dans une chambre noire à intervalles égaux très rapprochés, et, à chaque fois, une image se forme sur une surface sensible. La durée de l'admission est réduite à une très petite fraction de seconde pour que le déplacement de l'objet reste inappréciable pendant chaque pose. Les admissions régulières de la lumière de l'objet s'obtiennent en plaçant sur l'objectif un ***disque obturateur*** percé de fentes radiales équidistantes et animé d'un mouvement de rotation rapide et uniforme. La surface sensible est une bande pelliculaire en mouvement, disposée dans le plan focal de l'objectif et immobilisée automatiquement pendant le temps où elle est impressionnée (2).

En développant la bande pelliculaire, on suivra les phases d'un mouvement quelconque : marche, saut, vol, etc.

Synthèse du mouvement. — On remplace dans l'appareil chronophotographique la bande pelliculaire négative par son épreuve positive tirée sur une pellicule semblable, et on lui fait exécuter le mouvement saccadé de la première, avec arrêt pendant les projections. En tournant, l'obturateur présente une de ses parties pleines pendant que la bande descend et une de ses parties évidées quand la bande, immobile, est projetée. Les photographies fortement éclairées par transparence sont projetées, à l'aide de l'objectif photographique lui-même, dans l'ordre où elles ont été précédemment produites. En raison de la *persistance des*

---

(1) Si l'on a produit l'épreuve positive au charbon sur une glace et qu'on la laisse sécher, on a une image rigide en relief. Dans la ***photogravure,*** on se sert de cette planche en relief pour obtenir, par galvanoplastie, un moulage en cuivre en creux. Ce moulage est employé pour le tirage aux encres grasses par les procédés de l'imprimerie.

(2) L'emploi du disque obturateur devient inutile si l'objet est placé dans l'obscurité en face de l'objectif et n'est éclairé que par intermittences très courtes et périodiques.

impressions sur la rétine, les éclipses qui séparent les périodes d'éclairement passent inaperçues, si le nombre des images s'élève à environ 15 par seconde et le spectateur a *l'illusion du mouvement* des personnages

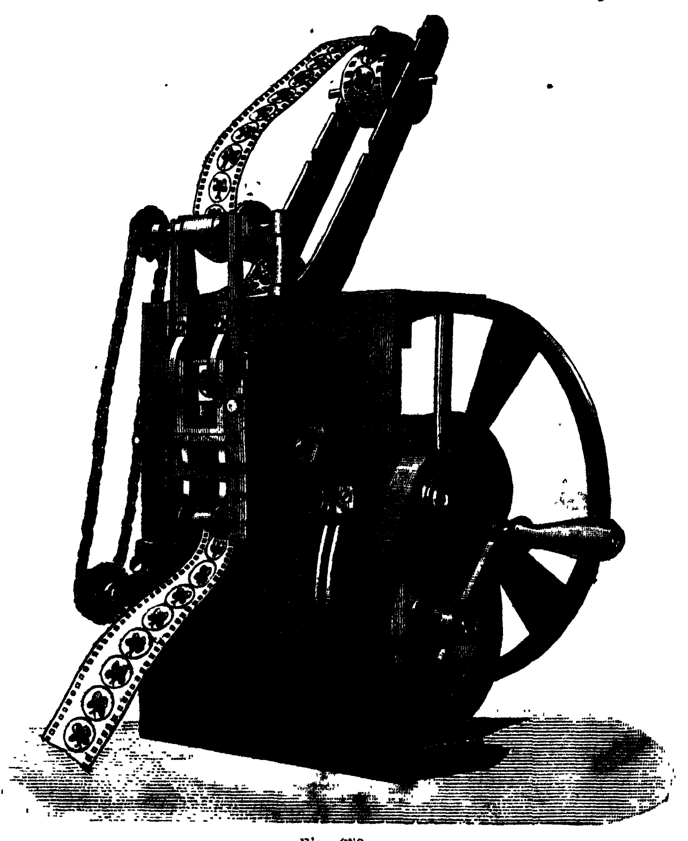


Fig. 650.

ou des objets. La pellicule ne se déplace que pendant les éclipses et à chacun des déplacements une image photographique se substitue exactement à la précédente derrière l'objectif. Les images successives sont extrêmement nombreuses et le changement de l'une à la suivante est inappréciable (fig. 650).

Les instruments chronophotographiques qui réalisent l'analyse et la synthèse des mouvements sont des **cinématographes**.

ONDES LUMINEUSES

554. On reconnaît directement que les corps sonores sont animés d'un mouvement vibratoire dont les oscillations sont **isochrones**. La périodicité de ce mouvement vibratoire détermine le phénomène de l'**Interférence sonore** ou du silence continu en des points qui reçoivent, simultanément et dans certaines conditions, l'action de deux sources sonores.

Hypothèse du mouvement vibratoire lumineux. — Comme on observe l'interférence *lumineuse* dans des conditions analogues aux précédentes, on est conduit à attribuer aussi aux corps lumineux un mouvement vibratoire périodique. C'est dans ce cas une *hypothèse*, car le mouvement vibratoire des particules lumineuses est trop rapide pour être observé directement; toutefois, cette hypothèse est justifiée par ses conséquences.

Hypothèse de l'éther. — L'hypothèse du mouvement lumineux en entraîne une autre. Comme tout mouvement vibratoire, le mouvement lumineux ne peut se transmettre que par un **milieu élastique** qui entre lui-même en vibration. Comme la lumière traverse le vide et les intervalles célestes, la densité du milieu qui propage la lumière est beaucoup plus faible que la densité des gaz les plus raréfiés. Ce milieu spécial, appelé **éther**, occupe tout l'espace; il doit pénétrer tous les corps, car certains corps opaques aux radiations que notre œil perçoit sont transparents pour d'autres radiations de même nature.

555. Qualités d'une lumière. — En Acoustique, les sons se distinguent entre eux par deux qualités essentielles qui dépendent de leur état vibratoire : l'*intensité* et la *hauteur*. Les diverses lumières se distinguent de même par deux qualités correspondantes.

L'intensité sonore a pour analogue l'**intensité lumineuse** qui augmente avec l'*amplitude* des vibrations lumineuses.

La **couleur**, analogue à la hauteur en acoustique, est *caractérisée* par la fréquence *n*. En désignant par T la *période*, on a $nT = 1$.

556. Propagation d'un mouvement vibratoire lumineux. — Les mouvements de va-et-vient des particules des corps lumineux se communiquent à l'éther et la propagation se fait, dans ce milieu, par *ondes* de proche en proche, *sans transport de matière*.

Les vibrations lumineuses sont transversales. — Tandis que les vibrations sonores sont *longitudinales*, ayant lieu dans le sens de la propagation du son, les vibrations lumineuses sont **transversales**, ou perpendiculaires à la direction de propagation. Les vibrations transversales se propagent comme les oscillations provoquées par le choc d'une pierre sur une surface liquide. Elles ressemblent aux ondulations d'un tuyau de caoutchouc tendu horizontalement entre deux points, lorsqu'un coup sec perpendiculaire à la direction du tuyau à l'une de ses extrémités, produit une ondulation transversale qui se propage jusqu'à l'autre extrémité.

Surface d'onde. — Dans le vide, dans l'air, et dans les milieux homogènes *à réfraction simple,* la propagation de la lumière est uniforme en tous sens. Les points d'une surface sphérique qui a le point lumineux pour centre sont alors, au même instant, dans un même état vibratoire. L'ensemble des points d'une de ces surfaces sphériques s'appelle une **surface d'onde**. Comme les vibrations lumineuses sont transversales, les déplacements des molécules d'éther se font sur les surfaces d'onde au lieu de se faire, comme pour des vibrations longitudinales, dans le sens des rayons.

Longueur d'onde. — Pendant la durée d'une vibration d'une particule, son mouvement se communique, dans le sens de la propagation, à une file de molécules sur une longueur appelée **longueur d'onde**. La longueur d'onde λ est l'espace parcouru par le mouvement vibratoire pendant la durée T d'une vibration complète.

D'après l'étude antérieure des ondes liquides et des ondes sonores: Sur **deux surfaces d'onde distantes entre elles d'une longueur d'onde**, les déplacements transversaux des particules d'éther sont, au même instant, *dans une même phase de la vibration*.

Sur **deux surfaces d'onde distantes entre elles d'une demi-longueur d'onde**, les déplacements transversaux des particules d'éther sont, à un même instant, *dans des phases opposées*.

D'une façon générale : sur deux surfaces d'onde distantes du centre

d'ébranlement de λ, 2λ, 3λ... les déplacements transversaux sont de même phase ; ils sont de phases opposées sur deux surfaces d'onde distantes de $\frac{\lambda}{2}$, $3\frac{\lambda}{2}$, $5\frac{\lambda}{2}$...

Vitesse de propagation, période, longueur d'onde. — La *vitesse de propagation* V, la *fréquence n*, la *période* T et la *longueur d'onde* λ sont d'un ordre de grandeur très différent pour les vibrations sonores et pour les vibrations lumineuses.

La **vitesse** du son dans l'air à 15° est de 340 mètres par seconde ; la vitesse de la lumière dans le vide (ou approximativement dans l'air) est de 300 mille kilomètres par seconde (3.10^{10} cm.).

La **fréquence** des vibrations des sons perceptibles est comprise entre 20 et 20.000, la fréquence des radiations qui impressionnent notre rétine est comprise entre 400 et 700 trillions. Puisque la **période** est en raison inverse de la fréquence, *la période des vibrations lumineuses est extrêmement petite.*

Le rouge est la couleur aux vibrations les plus lentes ; les vibrations du violet sont les plus rapides (1).

On a $\lambda = VT$. D'autre part, d'après la relation $nT = 1$, l'équation $\lambda = VT$ équivaut à $V = n\lambda$.

L'éther transmet *dans le vide toutes* les radiations, avec la *vitesse* de 3.10^{10} centimètres par seconde.

Pour la radiation de la lumière jaune d'une lampe à alcool salé (raie D)

$$\lambda = 0^{\mu},589 \ (2) = 0^{mm},000589 = 0^{cm},0000589 = 5,89.10^{-5}$$

$$n = \frac{V}{\lambda} = \frac{3.10^{10}}{5,89.10^{-5}} = 5,1.10^{14}.$$

Pour $\lambda = 0^{\mu},6$ $\quad n = 5.10^{14}$ ou 500 trillions.

En Acoustique, les nombres qui représentent les fréquences et les périodes ne sont ni trop grands ni trop petits et on en apprécie facilement la valeur ; il en est de même des longueurs d'onde.

En Optique, les fréquences sont beaucoup trop grandes et les périodes beaucoup trop petites ; c'est par *la longueur d'onde dans le vide* que l'on caractérise les radiations.

557. Longueurs d'onde des diverses radiations. — Dans le **spectre solaire**, la longueur d'onde des radiations les plus lumineuses (entre E et F) est voisine de $0^{\mu},5$. Un appareil thermomé-

---

(1) L'impression colorée due à une radiation lumineuse simple est liée à la fréquence, comme l'impression musicale d'un son simple est due à la hauteur; le rouge est plus grave, le violet plus aigu. Une lumière composée est comparable à un son formé par la production simultanée de plusieurs sons simples.

(2) μ est le *micron* ou millième de millimètre.

trique très sensible révèle **dans** l'infra-rouge des radiations dont les longueurs d'onde croissent de $0^\mu,4$ à 4μ. Dans l'ultra-violet, on est parvenu par la photographie jusqu'à la longueur d'onde $0^\mu,25$.

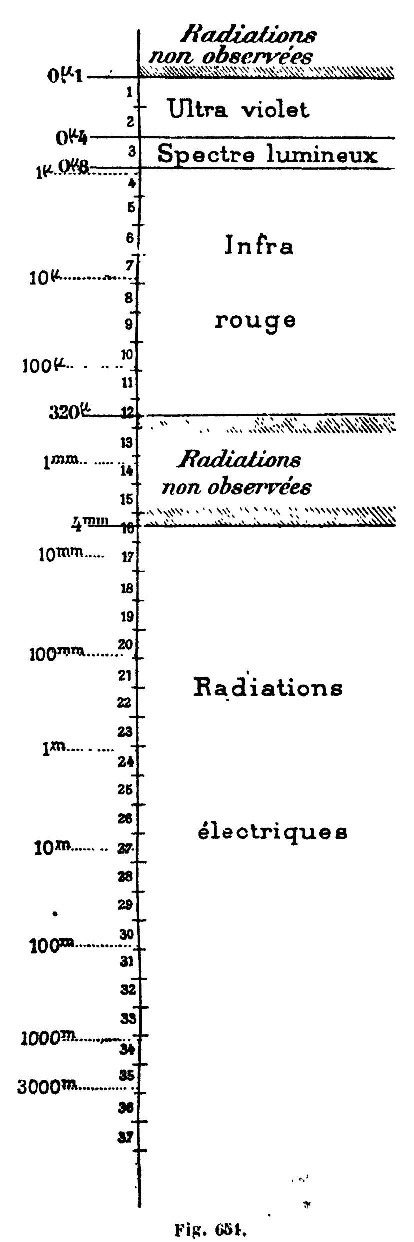


Fig. 651.

Les radiations solaires ne nous parviennent pas toutes, à cause de *l'absorption* de l'atmosphère terrestre. D'ailleurs, l'analyse spectrale de **sources artificielles** a fait découvrir des radiations *plus lentes* que l'infra-rouge solaire et *plus rapides* que l'ultra-violet solaire.

Vibrations lentes. — L'étude du rayonnement thermique émis par différentes sources a fait reconnaître des radiations dont la longueur d'onde atteint 320μ ou $0^{mm}32$ (400 fois plus lentes que les vibrations du rouge extrême solaire visible).

Vibrations rapides. — Les vibrations les plus rapides de l'ultra-violet que l'on puisse inscrire sur une plaque photographique ont été obtenues avec l'arc voltaïque et dans le vide. On est ainsi descendu jusqu'à $0^\mu,1$.

Étendue du spectre des vibrations de l'éther. — Les vibrations lumineuses et calorifiques connues sont comprises entre 320μ et $0^\mu,1$.

Les rayons X paraissent dus à des vibrations de l'éther, de longueur d'onde infiniment plus courte que celle des rayons ultra-violets.

D'autre part, les décharges électriques font naître des vibrations de l'éther beaucoup moins rapides que les vibrations infra-rouges les moins réfrangibles.

Pour l'ensemble des vibrations de l'éther, quelle que soit leur origine, la *fréquence* est comprise entre des limites très étendues.

L'intervalle de deux longueurs d'onde dont l'une est double de l'autre peut s'appeler un intervalle d'une octave. L'ultra-violet en comprend deux : $0^\mu,1$ à $0^\mu,2$ et $0^\mu,2$ à $0^\mu,4$; le

spectre visible, un seul : $0^{\mu},4$ à $0^{\mu},8$; l'infra-rouge s'étend sur neuf environ. Les vibrations électriques s'étendent sur plus de 20 intervalles d'octave, de 4 mm. à 6000 m. (1) (fig. 651).

En résumé, l'immensité de l'univers, remplie par l'éther, est sillonnée de vagues, dont les longueurs d'onde forment trois groupes : 1° de très courtes, à effets lumineux; 2° de plus longues, à effets calorifiques; 3° de beaucoup plus longues, à effets électriques.

Graduation d'un spectroscope. — Une radiation correspond dans un spectroscope au numéro du *micromètre* qu'elle recouvre. Les indications des divers spectroscopes deviennent comparables si l'on effectue leur *graduation en longueurs d'onde*. A cet effet, on porte sur une horizontale les numéros du micromètre et sur des perpendiculaires les longueurs d'onde de quelques *raies de longueurs d'onde connues*.

On trace ainsi une *courbe de graduation* dont chaque ordonnée est la longueur d'onde d'une raie qui occupe un numéro du micromètre.

558. Influence du déplacement relatif sur la fréquence apparente d'une radiation. — Si l'on reçoit sur un spectroscope la lumière d'une source *en mouvement*, les raies de son spectre *se déplacent* vers le rouge si la source s'éloigne de l'observateur, elles se déplacent vers le violet si la source se rapproche.

En répétant les raisonnements faits en Acoustique (**442**), on voit que si une source lumineuse *s'éloigne* avec la vitesse v d'un observateur fixe, la fréquence apparente n' d'une radiation de cette source diminue; V étant la vitesse de propagation de la lumière, $n' = n \frac{V}{V+v}$, la radiation se déplace dans le spectre *du côté du rouge*. Comme V ne varie pas, on a :

$$V = n\lambda = n'\lambda' \quad \text{et } \lambda' = \lambda\left(\frac{V+v}{V}\right) = \lambda\left(1 + \frac{v}{V}\right)$$

la longueur d'onde réelle λ prend une valeur apparente plus grande λ'. On obtient la vitesse v de la source qui donne lieu à un déplacement égal à l'intervalle $\lambda'-\lambda$ en résolvant par rapport à v l'équation qui donne λ' :

$$\frac{v}{V} = \frac{\lambda'-\lambda}{\lambda}.$$

Si le déplacement égale l'*intervalle des deux radiations* de la raie D; $\lambda' = 0^{\mu},5895$ $\lambda = 0^{\mu},5889$; on trouve $v = 305$ km. par seconde.

On a ainsi calculé la vitesse d'éloignement ou de rapprochement toiles, *sans avoir à se préoccuper de leur distance* à la Terre.

Les mêmes observations ont permis de *distinguer*, dans le spectre solaire, les raies d'***origine tellurique*** et les raies d'***origine solaire***.

Le Soleil tourne autour de son diamètre polaire et la vitesse d'un point de son équateur est de 2 kilomètres par seconde. L'un de ses bords s'éloigne de nous et le bord opposé se rapproche. Pour le bord qui s'éloigne les longueurs d'onde de toutes les radiations sont augmentées,

(1) Toutes les vibrations précédentes de l'éther sont transversales. Leur *vitesse de propagation* est la même pour toutes, égale à $3,10^{10}$ cm. D'après la relation $\lambda = VT$, pendant la durée d'une seule vibration électrique de 3 mille mètres de longueur d'onde, une lumière de longueur d'onde $0^{\mu},3$ exécute dix milliards de vibrations.

elles sont diminuées pour le bord qui se rapproche. Si l'on projette l'image d'un bord équatorial du Soleil sur la moitié supérieure de la fente d'un spectroscope et l'image de l'autre bord sur la moitié inférieure, les raies d'origine solaire sont brisées à la ligne de séparation des deux spectres. La distance dans les deux spectres d'une même raie d'origine solaire vaut environ $\frac{1}{76}$ de l'intervalle des deux raies D, cet intervalle correspond à la variation de la vitesse relative qui est de 4 kilomètres, suivant que l'on projette l'un ou l'autre bord sur la fente; on a en effet sensiblement 305 = 4.76. Les raies du spectre solaire d'origine tellurique sont en prolongement exact dans les deux spectres.

559. Vitesses de propagation dans les différents corps. — L'éther imprègne tous les corps et la propagation du mouvement vibratoire lumineux se fait par cet éther, mais il y a entre la substance d'un corps et l'éther qui le pénètre des liaisons telles que la vitesse de la lumière varie avec la nature du corps dans lequel elle se propage.

Dans les milieux homogènes plus réfringents que l'air, *où l'élasticité est la même dans tous les sens*, les vibrations lumineuses se transmettent avec la même vitesse dans toutes les directions et les surfaces d'onde sont des sphères. La lumière s'y propage moins vite que dans l'air et la *vitesse de propagation change avec le milieu.*

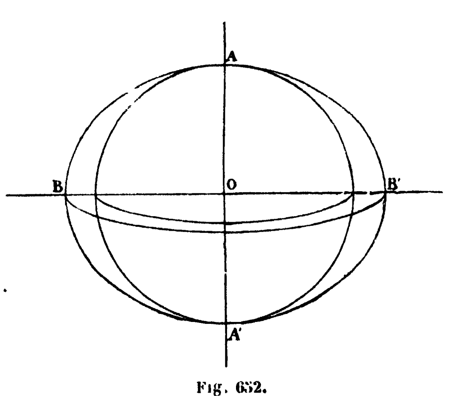


Fig. 652.

Il y a des corps homogènes *où l'élasticité varie autour de chaque point avec la direction.* Dans ces corps, l'éther présente les mêmes variations d'élasticité, et la lumière s'y propage avec une vitesse qui varie suivant la direction. Ces milieux sont doués d'une *double réfraction.* Leurs surfaces d'onde ne sont plus sphériques.

Dans les cristaux *biréfringents* à un axe, la surface d'onde se compose d'une sphère et d'un ellipsoïde de révolution autour de l'axe optique, tangent à la sphère en ses points de rencontre A et A' avec cet axe (1).

560. Valeur théorique de l'indice de réfraction. — On démontre que l'indice d'une substance 2 par rapport à une substance 1 est égal au quotient de la vitesse V_1 de propagation de la lumière dans le milieu 1 par la vitesse V_2 de propagation dans le milieu 2 : $m_2^1 = \frac{V_1}{V_2}$.

Conséquences. — 1° m_1^2 est égal à $\frac{V_2}{V_1}$; d'où $m_2^1 = \frac{1}{m_1^2}$.

(1) Dans le cas du spath (cristal négatif), l'ellipsoïde est extérieur à la sphère, il a son petit axe sur l'axe optique (fig. 652). Dans le cas du quartz (cristal positif), l'ellipsoïde est intérieur à la sphère.

La vitesse V_2 de la lumière dans un milieu d'indice m est le quotient par m de la vitesse V_1 dans le vide. Ainsi la vitesse de la lumière jaune dans le verre est le quotient de 300 mille km. par $\frac{3}{2}$ ou 200 mille km.

2° Étant données deux lames parallèles, en contact ou séparées, plongées dans un même milieu (fig. 519)

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{V_1}{V_2}, \quad \frac{\sin i_2}{\sin i_3} = \frac{V_2}{V_3}, \quad \frac{\sin i_3}{\sin i'_1} = \frac{V_3}{V_1}.$$

En multipliant, on obtient : $\frac{\sin i_1}{\sin i'_1} = 1$, d'où $i'_1 = i_1$;

c'est le résultat expérimental de la sortie *parallèle* à l'entrée.

3° $m^2_3 = \frac{V_2}{V_3}$, $m^1_3 = \frac{V_1}{V_3}$, $m^1_2 = \frac{V_1}{V_2}$, on en déduit $m^2_3 = \frac{m^1_3}{m^1_2}$.

4° Dans la relation $m^1_2 \sin i_2 = m^1_3 \sin i_3$, remplaçons m^1_2 par $\frac{V_1}{V_2}$, m^1_3 par $\frac{V_1}{V_3}$; nous obtenons $\frac{\sin i_2}{V_2} = \frac{\sin i_3}{V_3}$, forme sous laquelle on peut mettre la loi générale de la réfraction simple.

5° La couleur d'une radiation *restant invariable* dans ses trajets et étant définie par sa période T, sa longueur d'onde λ_1 dans le milieu 1, et sa longueur d'onde λ_2 dans le milieu 2 sont : $\lambda_1 = V_1T$ et $\lambda_2 = V_2T$; la longueur d'onde d'une radiation dans un milieu est donc proportionnelle à sa vitesse de propagation, dans ce milieu.

$$\text{De là :} \quad \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{V_1}{V_2} = m^1_2 .$$

Soit λ la longueur d'onde d'une radiation dans le vide, λ' sa longueur d'onde dans un milieu d'indice m (par rapport au vide), on a $\lambda = m\lambda'$.

Construction d'Huygens. — Une construction géométrique donne la marche d'un rayon réfracté.

Réfraction simple. — ***Passage dans un milieu plus réfringent.*** — Soit MN la surface de séparation de deux milieux 1 et 2 (2 plus réfringent que 1) dans lesquels les vitesses de propagation sont V_1 et V_2; SI est un rayon incident venant du premier milieu; du point d'incidence I, pris pour centre, on trace dans le plan d'incidence deux circonférences de rayons V_1 et V_2; on prolonge SI jusqu'à la circonférence V_1, et au point d'intersection A, on mène une tangente jusqu'à sa rencontre K avec la surface MN; du point K on mène une tangente à la circon-

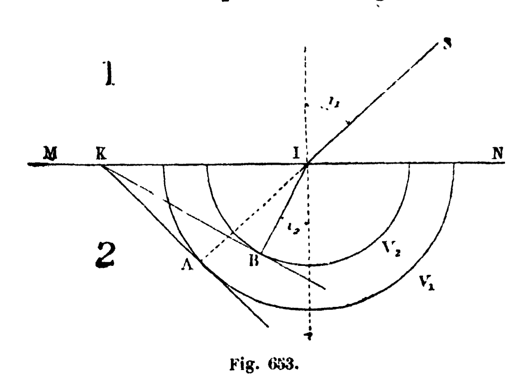


Fig. 653.

férence V_2, soit B le point de contact, le *rayon réfracté* est IB (fig. 653).

En effet IA $= V_1 =$ IK sin i_1 ; et IB $= V_2 =$ IK sin i_2 ;

$$\text{d'où} \quad \frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{V_1}{V_2} = m^1_2 .$$

i_2 est donc bien l'angle de réfraction (1).

Passage dans un milieu moins réfringent. — Supposons que la lumière passe du milieu 2 dans le milieu 1.

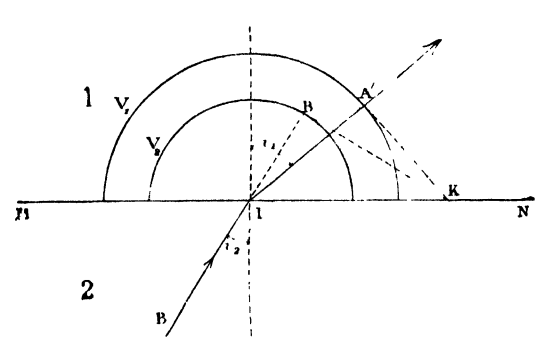


Fig. 654.

Appelons i_2 l'angle que le rayon incident BI fait avec la normale, prolongeons ce rayon jusqu'à la circonférence de rayon V_2. Au point d'intersection B', on mène une tangente jusqu'à sa rencontre K avec la surface MN ; du point K on mène une tangente à la circonférence V_1 ; soit A' le point de contact, le *rayon réfracté* est IA' (fig. 654).

En effet IB' $= V_2 =$ IK sin i_2; IA' $= V_1 =$ IK sin i_1,

$$\text{d'où} \quad \frac{\sin i_2}{\sin i_1} = \frac{V_2}{V_1} = m^2_1 = \frac{1}{m^1_2}.$$

La construction donne l'angle i_1 qui correspondait à l'angle i_2 dans le passage du milieu 1 au milieu 2.

Réflexion totale. — Au passage de 2 dans 1, la construction n'est possible que si le point K reste extérieur à la circonférence de rayon V_2 ; lorsque K est sur la circonférence même, le rayon réfracté IK sort en rasant la surface, $i_1 = 90°$. Le dernier rayon susceptible de sortir fait ainsi avec la normale en I un angle R (*angle limite*) donné par

$$\frac{\sin R}{1} = \frac{1}{m^1_2}.$$

561. Spectre normal. — La dispersion varie avec la substance du

(1) La construction d'Huygens peut être énoncée sous une autre forme : SI étant un rayon incident venant du premier milieu, du point I d'incidence comme centre, *on décrit deux surfaces* : 1° une sphère ayant un rayon V_1 égal à la vitesse de propagation de la lumière dans le premier milieu ; 2° une sphère d'un rayon V_2 égal à la vitesse de propagation dans le second milieu. On prolonge le rayon incident jusqu'à sa rencontre avec la sphère de rayon V_1 qui est la surface d'onde relative au premier milieu, par le point de rencontre A, on mène un plan tangent à cette surface ; par la droite K d'intersection de ce plan tangent et de la surface de séparation MN des deux milieux, on mène un plan tangent à la sphère de rayon V_2 qui est la surface d'onde relative au second milieu. En joignant le point de contact B au point I, on obtient le *rayon réfracté*.

Cette règle s'étend *à la double réfraction*. Dans la réfraction simple, la construction reste plane, les points A et B se trouvant dans le plan d'incidence.

prisme qui analyse une lumière. Avec deux prismes de dispersion différente, on peut, en diminuant l'angle réfringent pour le prisme de dispersion la plus forte, obtenir deux spectres de *même étendue totale*, mais le plus souvent, une même couleur n'occupe pas alors des longueurs égales dans les spectres des deux prismes.

On dit qu'un spectre est *normal* quand *la déviation d'une radiation est proportionnelle à la longueur d'onde de cette radiation;* dans un tel spectre, la répartition des divers effets n'est pas la même qu'avec un prisme. Car la déviation d'une radiation déterminée par un prisme n'est pas une fonction simple de la longueur d'ondulation. Dans une dispersion prismatique, les rayons peu réfrangibles sont resserrés dans un petit espace angulaire tandis que les rayons très réfrangibles sont incomparablement plus dispersés.

Les spectres des *réseaux* sont des spectres normaux (**570**).

562. Anomalies de dispersion. — Dans la dispersion, les radiations se succèdent dans l'ordre de leurs longueurs d'onde, la déviation croissant quand la longueur d'onde diminue (du rouge au violet). Cet ordre de succession avait été le seul observé pendant longtemps, pourtant il n'est pas général. On savait depuis 1862 que la vapeur d'iode réfracte le rouge plus fortement que le bleu. On a reconnu ensuite des anomalies analogues chez les substances dites à *couleurs superficielles* (ou présentant par réflexion d'autres couleurs que par transmission). Ainsi une solution alcoolique de fuchsine, renfermée à cause de son opacité dans un prisme à angle très aigu, donne un spectre qui commence par le violet, moins dévié, et finit par le rouge et le jaune. Ces anomalies tiennent à une perturbation dans la déviation au voisinage d'une bande d'absorption.

INTERFÉRENCES LUMINEUSES

563. Le principe des interférences s'applique aux ondes lumineuses comme aux ondes liquides et aux ondes sonores. Les conditions d'interférence *sont les mêmes* pour les trois espèces d'ondes.

Considérons deux systèmes d'ondes lumineuses, issues de deux points lumineux S' et S'' qui ont la même période et sont, à tout instant, dans une même phase de leur vibration (fig. 655).

1° Soit un point a où les deux systèmes d'ondes *élèvent également*, au même moment, les particules d'éther au-dessus du rayon de propagation (coïncidence de deux crêtes) ou bien, soit un point a_1 où les deux systèmes d'ondes *abaissent également* les particules d'éther au-dessous du rayon de propagation (coïncidence de deux sillons); les écarts s'ajoutent en a comme en a_1 et, en ces points, les particules d'éther prennent une amplitude double. A l'accroissement d'amplitude correspond une *augmentation de l'intensité lumineuse*.

2° En un point *n* où l'un des systèmes élève les particules d'éther au-dessus du rayon de propagation au moment précis où l'autre

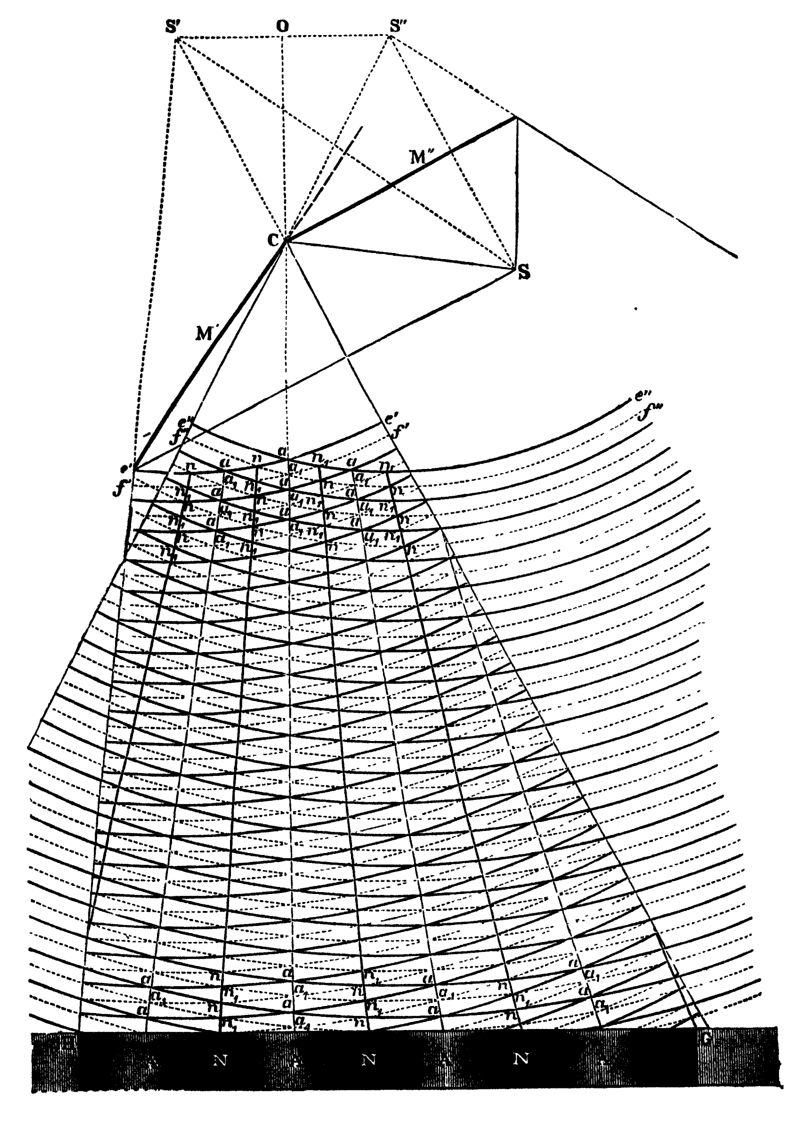


Fig. 655.

système les abaisse également (coïncidence d'une crête et d'un sillon), l'éther reste en repos. Le repos correspond à de *l'obscurité;* on dit qu'il y a **interférence** en *n*.

564. Expérience des deux miroirs de Fresnel. — Sur deux miroirs M et M′, *très peu inclinés* l'un sur l'autre, on produit deux images S′ et S″ d'un point lumineux S. Il y a entrecroisement de deux systèmes d'ondes dans la *région commune* aux deux faisceaux qui partent des images virtuelles S′ et S″.

L'arête du dièdre des deux miroirs étant perpendiculaire au plan des trois points S, S′, S″, les intersections par ce plan des deux

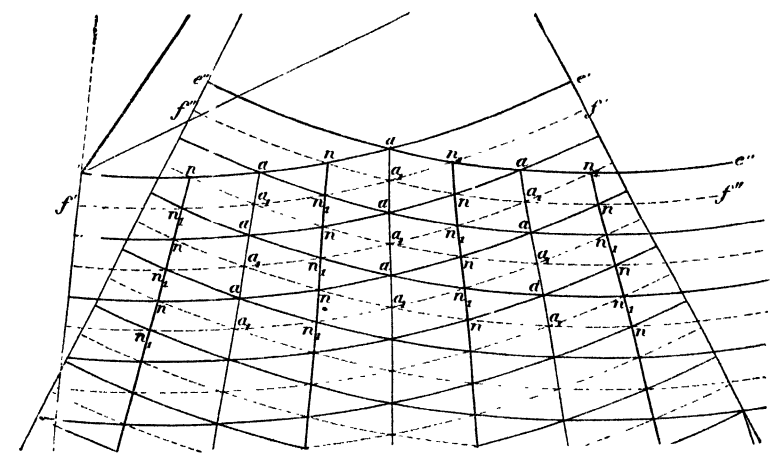


Fig. 656.

systèmes d'ondes sphériques sont des circonférences (e' et f', e'' et f'') de centres S′ et S″ (fig. 655 et 656).

Par les points a, où la différence des distances aux deux sources est λ, et par les points a où la différence est 2λ, passent des courbes d'*intensité maximum. Sur ces courbes*, la différence des distances aux deux sources est *un nombre pair de demi-longueurs d'onde.* L'intensité est maximum sur la droite OC, perpendiculaire au milieu de S′S″, à égale distance des deux sources.

Les points n d'intensité nulle sont sur des courbes où la différence des distances aux deux sources est $\frac{\lambda}{2}$ ou $3\,\frac{\lambda}{2}$ ou $5\frac{\lambda}{2}$... *Sur les courbes d'intensité nulle*, la différence des distances aux deux sources est *un nombre impair de demi-longueurs d'onde* (1).

Dans l'espace, les points d'intensité maximum forment des *sur-*

(1) **Les courbes d'intensité maximum et les courbes d'intensité nulle sont, dans le plan SS′S″, des hyperboles qui ont pour foyers S′ et S″, d'après l'équation $aS'' - aS' = p\,\frac{\lambda}{2}$.**

faces; les points d'intensité nulle forment d'autres surfaces. Les courbes de la figure 655 sont les intersections de ces surfaces par le plan des trois points, S, S' et S''.

En recevant la lumière sur un écran perpendiculaire à la ligne OC et au plan SS'S'' (cet écran est rabattu en GH dans le plan SS'S''), on observe, dans la région éclairée à la fois par les deux faisceaux qui viennent de S' et de S'', des bandes verticales équidistantes, alternativement lumineuses et obscures. Les *bandes lumineuses* A sont les intersections par l'écran des surfaces d'intensité maximum et les *bandes obscures* N sont les intersections des surfaces d'intensité nulle. Ces bandes ont reçu le nom de **franges** (fig. 655).

Si la source S est *monochromatique,* par exemple jaune, les franges sont alternativement jaunes et noires. Les franges sont *plus serrées* avec le bleu, qui est *plus réfrangible* que le jaune.

Dans la lumière blanche, l'effet observé est la superposition des effets dus à chacune des couleurs qui constituent le blanc. On a une *frange centrale blanche* en A sur l'intersection de l'écran par le plan perpendiculaire sur le milieu de S'S'', car les distances aux deux sources y sont *égales pour toutes les couleurs.* Les autres franges sont *irisées.*

Les alternatives de lumière et d'obscurité sont bien dues à la superposition de deux systèmes d'ondes, car si l'on recouvre l'un des miroirs, tous les points de l'écran sont uniformément éclairés. *De la lumière* venant de S' *ajoutée à de la lumière* venant de S'' *produit donc, en certains points, de l'obscurité* (1).

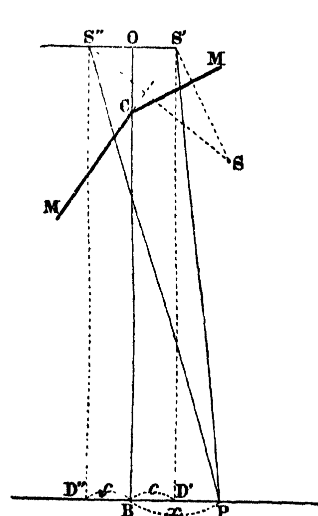


Fig. 657.

L'expérience des interférences lumineuses exige que les deux sources S' et S'' proviennent d'une *même* source S de petites dimensions.

Position des franges d'interférence. — Dans le plan SS'S'', perpendiculaire à l'intersection des deux miroirs, appelons $2c$ l'écartement des deux sources S' et S'', d la distance OB du milieu O de S'S'' à l'écran. Nous allons cal-

(1) Le fait que de la lumière ajoutée en un point à de la lumière peut produire de l'obscurité est *incompatible avec l'hypothèse de l'émission,* d'après laquelle une source lumineuse envoie en tous sens des *particules matérielles* dont le choc sur les objets produit la lumière.

cules, en lumière monochromatique : 1° la distance PB ou x des franges successives à la frange centrale ; 2° la longueur d'onde de la source S (fig. 657).

Soit en P une frange d'ordre p, telle que $PS'' - PS' = p\,\frac{\lambda}{2}$.

$$PS'' = \sqrt{(x+c)^2 + d^2} = d\left[1 + \frac{(x+c)^2}{d^2}\right]^{\frac{1}{2}} = d\left[1 + \frac{1}{2}\cdot\frac{(x+c)^2}{d^2} + \ldots\right]^{(1)}$$

$$PS' = \sqrt{(x-c)^2 + d^2} = d\left[1 + \frac{(x-c)^2}{d^2}\right]^{\frac{1}{2}} = d\left[1 + \frac{1}{2}\cdot\frac{(x-c)^2}{d^2} + \ldots\right]$$

$$PS'' - PS' = p\,\frac{\lambda}{2} = 2c\,\frac{x}{d}^{(2)}. \text{ On en déduit } x = p\,\frac{\lambda}{2}\cdot\frac{d}{2c}.$$

Les franges sont *équidistantes*, puisque la distance à la frange centrale de la frange d'ordre p est proportionnelle à p ; il en résulte que la distance d'une frange brillante à la frange obscure consécutive est constante et égale à $\frac{\lambda}{2}\frac{d}{2c}$ (3). Cette distance est proportionnelle à la distance d ou OB, en raison inverse de l'écartement $2c$ des deux sources. Elle est proportionnelle à la longueur d'ondulation λ, plus grande par conséquent pour une lumière rouge que pour une lumière violette.

La longueur d'ondulation de la source est $\lambda = \frac{4c}{d}\cdot\frac{x}{p}$; on la calcule après avoir mesuré $2c$, d et la distance PB ou x d'une frange d'ordre p.

565. Construction graphique de Fresnel. — Si l'on admet qu'un mouvement vibratoire lumineux est sinusoïdal, une construction graphique permet de trouver le mouvement d'une molécule d'éther en un point P éclairé par deux sources S' et S'', de même période.

La construction graphique de Fresnel conduit à *l'expression algébrique d'une somme $y' + y''$ de fonctions sinusoïdales.*

$$\text{Soient } y' = a' \sin\left(2\pi\,\frac{t}{T} + \alpha'\right) \text{ et } y'' = a'' \sin\left(2\pi\,\frac{t}{T} + \alpha''\right).$$

On trace une droite horizontale Ox dont la direction est prise pour origine des phases (fig. 658) et, à partir d'un point O, on mène un vecteur OC, égal à a' (amplitude de la première fonction), dans la direction α' = COx de sa phase. Puis, par l'extrémité C, on mène un second vecteur CE = a'' (amplitude de la seconde fonction), dans la direction α' de sa

(1) Vu la petitesse de $x + c$ et $x - c$ par rapport à d, dans les conditions de l'expérience, les puissances de $\frac{x+c}{d}$ et de $\frac{x-c}{d}$ supérieures à la seconde sont négligeables.

(2) On peut simplifier le calcul en écrivant :

$\overline{PS''}^2 - \overline{PS'}^2$ ou $(PS'' - PS')(PS'' + PS') = [(x+c)^2 + d^2] - [(x-c)^2 + d^2] = 4cx$; en remplaçant PS'' + PS' par une valeur approchée $2d$, on a $PS'' - PS' = \frac{2cx}{d}$.

(3) En raison de l'extrême rapprochement de deux franges consécutives, l'une brillante, l'autre obscure, pour une longueur d'ondulation déterminée λ, il faut que la source et les deux images qui en proviennent soient de très petites dimensions. Sans cela, une frange brillante due à deux points S' et S'' de chacune des sources se superposerait à une frange obscure due à un autre groupe de deux autres points S'_1 et S''_1 des deux sources. S'' — S''_1 — S' — S'_1 —

phase. On joint le point O à l'extrémité E obtenue, $OE = A$ est l'amplitude de la fonction sinusoïdale résultante y, $EOx = \varphi$ est sa phase.

$$y = A \sin\left(2\pi \frac{t}{T} + \varphi\right) = y' + y'' \quad (1).$$

Pour obtenir OE, on peut aussi porter OC suivant une horizontale

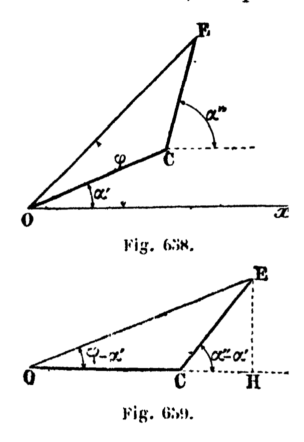


Fig. 658.

Fig. 659.

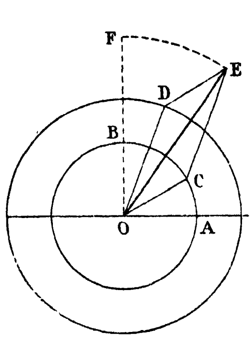


Fig. 660.

(fig. 659) puis, à partir de C, on porte CE dans la direction $\alpha'' - \alpha'$,

$$OE = A \quad \text{et } EOC = \varphi - \alpha'$$

$$\overline{OE}^2 = A^2 = (OC + CH)^2 + \overline{EH}^2 = [a' + a'' \cos(\alpha'' - \alpha')]^2 + a''^2 \sin^2(\alpha'' - \alpha'),$$

d'où $A^2 = a'^2 + a''^2 + 2a'a'' \cos(\alpha'' - \alpha')$.

$\alpha'' - \alpha'$ est la différence des phases des deux écarts y' et y''.

Dans l'application de la construction de Fresnel au problème actuel des interférences lumineuses, y' et y'' sont les écarts, d'amplitudes a'

---

(1) ***Démonstration de la règle de Fresnel.*** — Un rayon $OC = a'$ (fig. 660), qui *tourne* autour d'un point O *avec une vitesse angulaire uniforme* ω, décrit en un temps t un angle ωt. Si l'origine du temps correspond à la position OA du rayon, la projection, à un temps t, de OC sur une droite OB perpendiculaire à OA est $a' \sin \omega t$ ou $a' \sin \frac{2\pi t}{T}$, d'après $\omega T = 2\pi$, où T est la période de révolution de la droite OC.

Si, au temps zéro, la droite OC fait avec OA un angle $COA = \alpha'$, l'angle décrit par OC au temps t est $\omega t + \alpha'$ et la projection de OC sur OB est $a' \sin(\omega t + \alpha')$.

Supposons qu'un second rayon, $OD = a''$, d'une autre circonférence de centre O, tourne dans le même sens que OC, avec la même vitesse angulaire ω ; l'angle décrit, au temps t, par OD sera $\omega t + \alpha''$, si sa position, à l'origine du temps, fait un angle α'' avec OA et la projection de OD sur OB est $a'' \sin(\omega t + \alpha'')$.

Formons le parallélogramme de OC et CE (CE égal et parallèle à OD), la somme géométrique de OC et CE est OE et *d'après le théorème des projections* (**17**),

$$\text{Proj. OC} + \text{Proj. CE} = \text{Proj. OE}.$$

Or, le parallélogramme formé avec OC et OD reste invariable pendant la rotation de OC et OD ; $OE = A$ est donc constant et son extrémité E décrit avec la vitesse ω une circonférence de centre O. La projection de OE sur OB est ainsi $A \sin(\omega t + \varphi)$; $\varphi = EOA$ au temps zéro.

La somme algébrique $a' \sin(\omega t + \alpha') + a'' \sin(\omega t + \alpha'') = A \sin(\omega t + \varphi)$ est donc également sinusoïdale ; A et φ sont donnés par la somme géométrique des *vecteurs* a', et a'', de directions α' et α''.

et a'', des deux mouvements vibratoires que les deux sources S′ et S″ impriment séparément à un point P de l'écran BP.

L'écart en S′ et en S″ étant $a \sin 2\pi \frac{t}{T}$, les écarts, y' et y'', en P, s'écrivent (**427**) $y' = a' \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{PS'}{\lambda}\right) = a' \sin\left(2\pi \frac{t}{T} - \frac{2\pi PS'}{\lambda}\right)$

$$y' = a''. \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{PS''}{\lambda}\right) = a'' \sin\left(2\pi \frac{t}{T} - 2\pi \frac{PS''}{\lambda}\right).$$

On démontre que l'*intensité lumineuse en un point est proportionnelle au carré de l'amplitude* de l'écart sinusoïdal d'une molécule d'éther en vibration en ce point ; ici, a'^2 et a''^2 seraient les intensités en P dues aux sources S′ et S″ agissant séparément et A^2 est l'intensité due aux deux sources agissant simultanément. Comme S′ et S″ sont deux sources égales, dont la distance à P est sensiblement la même,

$$a' = a'' \text{ et } A^2 = 2a'^2 + 2a'^2 \cos(\alpha'' - \alpha') = 4a'^2 \cos^2 \frac{\alpha'' - \alpha'}{2}$$

Or, $\alpha'' - \alpha' = 2\pi \frac{\delta}{\lambda}$ où $\delta = PS'' - PS'$. On a : $A^2 = 4a^2 \cos^2 \frac{\pi\delta}{\lambda}$.

Si $PS'' - PS' = \frac{\lambda}{2}$ ou $\frac{3\lambda}{2}$ ou $(2K+1)\frac{\lambda}{2}$, $\cos^2 \frac{\pi\delta}{\lambda} = 0$ et $A^2 = 0$ ***franges noires***.

Si $PS'' - PS' = 2\frac{\lambda}{2}$ ou $\frac{4\lambda}{2}$ ou $2K\frac{\lambda}{2}$, $\cos^2 \pi\frac{\delta}{\lambda} = 1$ et $A^2 = 4a'^2$ ***franges brillantes***.

INTERFÉRENCES PAR RÉFLEXION

566. Quand un faisceau lumineux, formé de rayons *parallèles* SA (fig. 661), tombe normalement sur un miroir MM′, la superposition

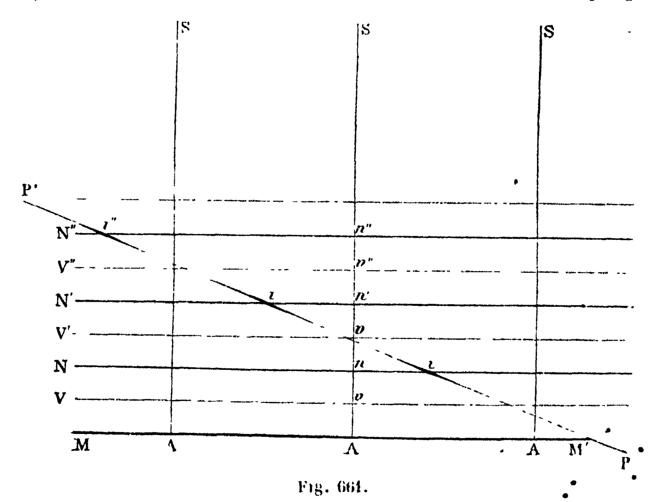


Fig. 661.

d'un *rayon direct* et d'un *rayon réfléchi sur le miroir* produit en avant du miroir des phénomènes d'interférence.

Les **nœuds** N, N′, N″,... et les **ventres** V, V′, V″,... forment des plans parallèles au miroir. Leur position est la même que dans la réflexion du son contre un mur (**430**). Le plan du mur est un nœud. Aux nœuds, distants du miroir de $2\frac{\lambda}{4}$, $4\frac{\lambda}{4}$, $6\frac{\lambda}{4}$..., il y a *minimum* de lumière; aux ventres, distants de $\frac{\lambda}{4}$, $3\frac{\lambda}{4}$..., il y a *maximum*.

On ne peut *distinguer* les nœuds *n*, *n′*... et les ventres *v*, *v′*.., sur *une perpendiculaire* à la surface du miroir, car la valeur de $\frac{\lambda}{4}$ ne dépasse guère 0^{mm},0001. On les reconnaît en recevant la lumière sur une pellicule photographique PP′, *très inclinée* sur le miroir; la distance *ii′* de deux nœuds est d'autant plus grande que l'inclinaison de la plaque est plus forte. Après développement, la plaque noircit aux maxima; les minima restent intacts.

DIFFRACTION

567. Un corps opaque éclairé par une source lumineuse projette une ombre sur un écran. Les *contours géométriques* de cette ombre se tracent d'après la propagation des rayons lumineux en ligne droite. Mais, dans certaines conditions, l'ombre n'est pas nettement limitée et on voit, soit dans l'ombre géométrique, soit dans la partie éclairée, des *franges alternativement brillantes et obscures*.

Ces effets spéciaux portent le nom de *phénomènes de diffraction*, en raison du *changement de direction* que les rayons paraissent subir pour pénétrer dans l'ombre géométrique. Ils s'observent particulièrement avec une source lumineuse de *très petites dimensions*, réduite à un point ou à une droite (1).

Point lumineux (fig. 664). — Recevons la lumière d'un point lumineux S sur une *petite ouverture circulaire* qui a son centre sur la perpendiculaire SA abaissée du point lumineux sur le plan de l'ouverture. Le tracé géométrique de l'ombre de l'ouverture sur un écran blanc parallèle au plan de l'ouverture donnerait un cercle brillant de centre B. Or, on voit en B, sur l'écran, une tache, *brillante ou obscure* suivant la distance de l'écran à l'ouverture; cette tache est entourée de circonférences concentriques qui sont alternativement obscures et brillantes dans une lumière monochromatique; elles sont irisées dans la lumière blanche.

(1) On obtient un point lumineux ou une droite brillante en pratiquant un petit trou ou une fente très fine dans la paroi d'une lanterne de projection.

Droite lumineuse. — Soit une petite droite lumineuse *très fine.*

1° Parallèlement à cette droite lumineuse et devant elle, on dispose une *fente étroite* percée dans une plaque opaque. La fente apparaît sur un écran comme un rectangle brillant, de même couleur que la source; à sa droite et à sa gauche, on voit des rectangles de même couleur, moins brillants, séparés par des intervalles obscurs.

Dans la lumière blanche, les rectangles deviennent de petits spectres, sauf pour l'image centrale qui est blanche. Ces spectres s'appellent des *franges de diffraction.*

2° En face de la droite lumineuse on tend parallèlement un *cheveu.* Au milieu de l'ombre projetée par le cheveu sur un écran blanc, on voit une bande brillante bordée de chaque côté par des bandes parallèles obscures et brillantes.

3° En face de la droite lumineuse on place un *réseau.* Un réseau est une plaque de verre sur laquelle on a tracé au diamant une série de traits opaques *parallèles, égaux, équidistants,* extrêmement rapprochés. La droite lumineuse est dirigée parallèlement aux traits. En traversant les fentes transparentes étroites, qui sont comprises entre les traits opaques, la lumière produit des bandes de diffraction. Dans la lumière blanche, ces bandes forment des *spectres* où les radiations les plus réfrangibles sont les moins déviées.

Certains phénomènes de diffraction sont d'observation vulgaire. Tels sont les cercles concentriques irisés ou *couronnes* qu'on voit autour du Soleil ou de la Lune, par les temps brumeux; les spectres que donne une flamme à travers une plume d'oiseau.

568. Explication des phénomènes de diffraction. — Les phénomènes de diffraction résultent de la propagation de la lumière par ondes. Leur théorie repose sur une proposition appelée principe d'Huygens.

Principe d'Huygens. — Quand un point lumineux S éclaire un point B, la lumière de S n'arrive en B qu'après avoir passé par les surfaces d'onde intermédiaires, de centre S. Si l'on en considère une quelconque MAM' (fig. 662), l'effet en B de la source S, est celui de la superposition des mouvements vibratoires issus de tous les points de MAM'.

On peut montrer que chacun des points d'une onde intermédiaire se comporte comme un centre de vibration. Sur un bain de mercure on fait plonger périodiquement une pointe fine portée par une des branches d'un diapason en vibration; à la surface du liquide on voit se former des ondes régulières *dont*

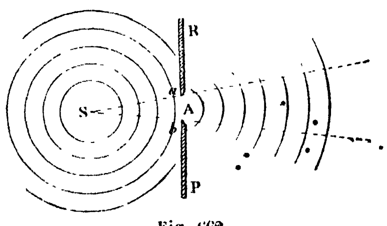


Fig. 662.

le centre S *est le point frappé* par la pointe. Si l'on place sur le trajet une cloison PR percée d'une petite ouverture A, on voit se former, au delà de l'ouverture, des ondes de *centre* A. Le mouvement issu de A s'étend en dehors des côtés de l'angle qui a pour base l'ouverture et pour sommet le point S (fig. 662).

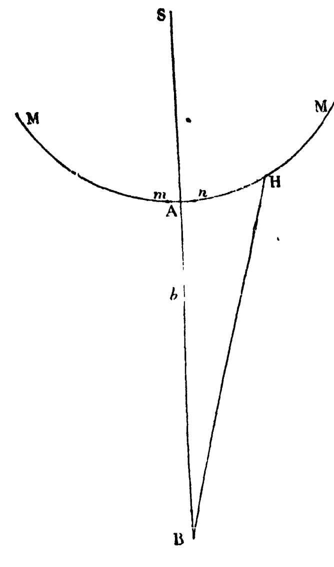


Fig. 663.

Sans cloison, tous les points d'une surface d'onde (fig. 663) agissent comme des sources lumineuses (1) *qui se trouvent au même instant dans une même phase de vibration.*

Pour trouver l'effet résultant produit en un point B, on compose les mouvements envoyés par les divers points vibrants de l'onde MAM'; comme ces points ne se trouvent pas à la même distance du point B, leurs mouvements vibratoires ne concordent pas en B.

On reconnaît que l'action en B d'une onde sphérique entière se réduit, à *l'action d'une zone sphérique efficace* très petite *mn*, qui entoure le point de rencontre A de la surface d'onde avec la droite BS (2) (fig. 663).

Si l'on supprime par un obstacle une partie de l'onde MAM', le mouvement résultant en B est dû aux portions conservées de l'onde.

569. ***Diffraction par une ouverture circulaire.*** — Pour donner un exemple, nous allons considérer un point lumineux S et une *ouverture circulaire* EE' percée dans un écran FF' et ayant son centre A sur la perpendiculaire SA au plan de l'écran. Nous nous bornerons à l'effet qu'on observe en un point B, situé sur la droite SA, quand on fait varier la distance du point B à l'ouverture (fig. 664).

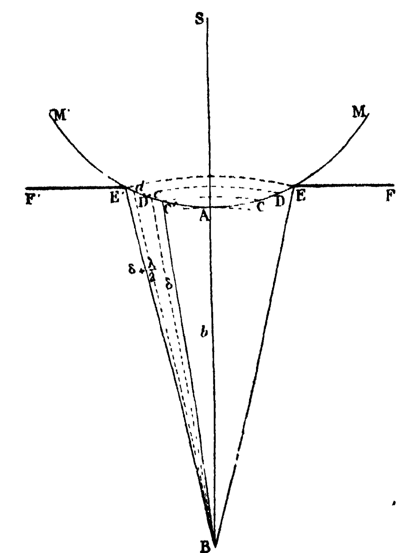


Fig. 664.

Du point B comme centre, avec

(1) Les ondes partielles envoyées par les différents points d'une surface d'onde MAM' sont, au bout d'un même temps, tangentes à une surface d'onde de centre S.

(2) Le *rayon lumineux* qui va de S en B n'est donc pas une droite SB, mais le chemin suivi par des *portions d'onde* extrêmement petites qui ont leurs milieux sur SB.

un rayon AB $+ \frac{\lambda}{2}$ ou $b + \frac{\lambda}{2}$, on décrit une sphère dont l'intersection avec la surface d'onde MAM′, dans un plan qui passe par la droite SA, est un cercle de diamètre CC′. Les intersections de cette surface d'onde avec des sphères décrites de B avec des rayons $b + 2\frac{\lambda}{2}$, $b + 3\frac{\lambda}{2}$, sont des cercles de diamètres DD′, EE′...

L'aire comprise sur l'onde sphérique entre deux cercles d'intersection consécutifs s'appelle une **zone**. Il n'y a pour agir à travers l'ouverture que des zones voisines du point A. *Ces zones étant sensiblement égales*, deux zones consécutives envoient en B des mouvements vibratoires sensiblement *égaux* et *de signes contraires*, car à un point de l'une, de distance $Bc = \delta$, correspond un point de l'autre de distance $Bd = \delta + \frac{\lambda}{2}$.

L'action exercée en B par la portion d'onde active EAE′ dépend alors du nombre de zones découpées sur sa surface, de B comme centre.

Le mouvement résultant est *nul* en B, si l'on peut tracer du point B un nombre *pair de zones*, puisque deux zones consécutives s'annulent. Le mouvement résultant est *maximum* en B si le nombre des zones découpées est *impair*; l'action est celle d'une seule zone (1).

Il y a donc obscurité en B si la différence des distances BE — BA est égale à $2p\frac{\lambda}{2}$ et, lorsque la différence vaut $(2p+1)\frac{\lambda}{2}$, l'intensité est maximum. Ces alternatives se présenteront successivement en rapprochant le point B de l'ouverture circulaire, sur la droite SA.

570. Théorie des réseaux. — Appliqué au cas d'un point lumineux très éloigné, le principe d'Huygens permet de considérer comme plane la portion d'onde qui est reçue par un *réseau* (**567**) éclairé normalement. Sur son étendue, la surface sphérique de l'onde est remplacée par son plan tangent. Le plan du réseau est, ainsi, une *onde plane* dont tous les points vibrent en concordance. Chaque fente du réseau envoie de la lumière en toute direction.

L'effet lumineux de l'ensemble des fentes est maximum dans la direction normale. Il y a encore des *maxima de lumière* à droite et à gauche de la direction normale, dans des directions inclinées telles que les rayons envoyés par les milieux (2) A_1 et A_2 de deux fentes consécutives soient *concordants;* cela

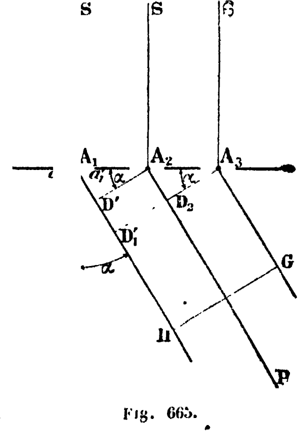


Fig. 665.

(1) L'intensité lumineuse vaut, dans ce cas, quatre fois la lumière envoyée par la petite zone *mn* (fig. 663) qui produit, sans écran, l'effet de l'onde totale.

(2) Les différents points d'*une même ouverture* envoient dans une direction déterminée des mouvements vibratoires sinusoïdaux parallèles qui présentent entre eux des différences de phase. Tous ces mouvements peuvent être remplacés par un seul qui a *la*

a lieu quand ils ont une différence de marche égale à la longueur d'onde λ de la source. Ainsi, il y a maximum d'effet par une radiation de longueur d'onde λ dans des directions α telles que $A_1 D' = \lambda$ ou 2λ, ou 3λ... ou $p\lambda$, p étant un nombre entier. Si l'on désigne par a la largeur d'une fente, par b la largeur d'un intervalle opaque, $A_1 A_2 = a + b$. Les directions α satisfont aux équations $A_1 D' = (a + b) \sin \alpha = p\lambda$. De là, pour les maxima :

$$\sin \alpha_1 = \frac{\lambda}{a+b}, \quad \sin \alpha_2 = \frac{2\lambda}{a+b} \ldots, \quad \sin \alpha = \frac{p\lambda}{a+b}.$$

En raison de la petitesse de λ, les déviations α_1 α_2 sont très petites... Les mouvements vibratoires issus des différentes fentes dans ces directions sont concordants en A_2 et D', en A_3 et D'_1...; ils sont aussi concordants sur un plan GH, perpendiculaire à la direction AP.

Quand un objectif reçoit des rayons parallèles de l'une des directions α, il les fait converger en un point m de son plan focal situé sur l'axe secondaire de cette direction et, en ce point, il y a maximum.

Dans la direction normale au réseau, on voit une fente centrale O qui a la même position que si le réseau n'existait pas. Les images qui correspondent aux différents maxima sont disposées *symétriquement* de part et d'autre de l'image centrale. En prenant pour source lumineuse une fente éclairée F qui a ses bords parallèles aux traits du réseau, les images sont, pour une lumière monochromatique, des bandes monochromatiques, parallèles entre elles et aux traits du réseau. Avec un faisceau incident qui comprend différentes radiations, chaque radiation fournit une intensité maximum dans une direction α, spéciale à la valeur de λ pour cette radiation. Dans la lumière blanche, les différentes radiations relatives à une direction de maximum sont étalées, dans le plan focal de l'objectif, en *un spectre où la déviation croît avec la longueur d'onde.* Le violet de chaque spectre est la couleur la moins déviée(1).

Les spectres des réseaux sont des spectres purs : avec la lumière solaire, on y voit nettement les raies.

---

phase du centre. En effet si l'on applique la construction de Fresnel aux vecteurs qui sont ici les amplitudes (*polygone des amplitudes*) et si l'on prend pour direction origine des phases une horizontale correspondant au mouvement issu d'un centre A_1, on obtient deux courbes identiques (fig. 666), l'une au-dessus de l'horizontale pour les points de la moitié $A_1 a_1$ de la fente, l'autre au dessous pour les points de la moitié $A_1 a'_1$. Les amplitudes résultantes sont pour chaque moitié : 1° la droite OF' qui joint l'origine à l'extrémité du polygone à côtés infiniment petits qui constitue la première courbe; 2° la droite OF'' pour la seconde courbe. La résultante définitive est la diagonale OE du losange de OF' et OF'' et cette *diagonale est dirigée suivant l'horizontale.* Le mouvement résultant a donc la phase du centre A_1. La même construction s'applique à toutes les fentes.

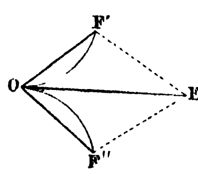


Fig. 666.

Pour cette raison, on a pu *substituer aux fentes leurs centres* A, A_1, A_2.

(1) Comme la longueur d'onde du violet est à peu près les deux tiers de la longueur d'onde du rouge, la déviation du deuxième maximum rouge coïncide avec la déviation du troisième maximum violet; d'après cela, le second spectre empiète sur le troisième; la superposition s'accentue pour les spectres plus écartés.

Les réseaux sont utilisés pour la ***mesure des longueurs d'onde*** dans l'air. A cet effet, un réseau de N traits transparents par millimètre (N est déterminé au microscope) est posé sur la plate-forme d'un goniomètre de Babinet (fig. 667). Les traits sont parallèles à la fente F du collimateur L; on reçoit les rayons déviés dans la lunette L' du goniomètre. Le réticule de l'oculaire est amené successivement sur les raies de l'un des spectres, du premier par exemple. Un angle α_1 correspondant à la longueur d'onde λ_1 est lu sur le cercle gradué du goniomètre, à partir de la position du réticule qui vise la bande centrale: l'équation $\lambda_1 = (a + b) \sin \alpha_1$ donne λ_1 en millimètres; on a $N(a + b) = 1$.

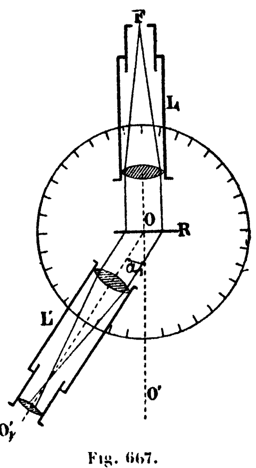


Fig. 667.

Le spectre des réseaux est choisi pour **spectre normal** (1) (**561**). En remplaçant par un réseau le prisme d'un spectroscope, on a un *spectroscope à réseau*.

571. Cercle de diffraction des lunettes. — Les phénomènes de diffraction apportent des perturbations dans les observations effectuées avec les instruments d'optique. Les rayons issus d'un point lumineux éloigné, situé sur l'axe principal d'un objectif vont converger au foyer: mais, même lorsque l'objectif est rigoureusement aplanétique et achromatique, l'image ne peut être un point. En effet, de ce que la portion de l'onde sphérique

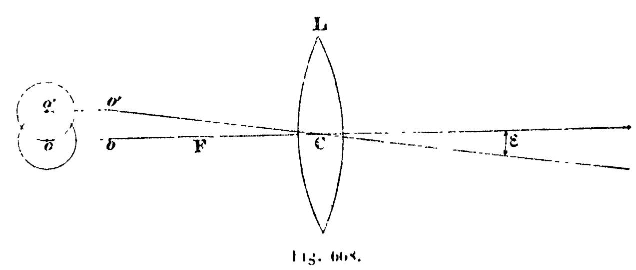


Fig. 668.

issue du point lumineux est réduite, pour former l'image, à l'ouverture de l'objectif, on démontre que l'*image d'un point* est une tache lumineuse ou *cercle de diffraction* (2).

On a calculé que le rayon r de ce cercle lumineux est proportionnel à la longueur d'onde λ de la lumière éclairante, à la distance focale F de l'objectif et en raison inverse du diamètre d de l'objectif; $r = \frac{K\lambda F}{d}$.

Dans l'image, deux points voisins ne peuvent être vus séparément, que

(1) Si le nombre des traits du réseau n'est pas très grand, les déviations sont très petites et elles sont, pour les diverses raies, proportionnelles aux longueurs d'onde correspondantes. L'équation $p\lambda = (a + b) \sin \alpha$ est remplacée par $p\lambda = (a + b)\alpha$.

(2) La tache est entourée de quelques anneaux peu visibles, alternativement obscurs et brillants dans une lumière monochromatique, irisés dans la lumière blanche.

si les centres de leurs cercles de diffraction sont au moins distants du rayon de ces cercles (fig. 668). D'après cela, la distance angulaire ε de ces deux points, prise du centre optique de l'objectif ou le *pouvoir séparateur* de la lunette est $\varepsilon = \frac{r}{F}$ ou $K \frac{\lambda}{d}$ (en radians).

K est un peu plus grand que l'unité, mais l'erreur est faible si l'on écrit $\varepsilon = \frac{\lambda}{d}$. On fait le calcul avec $\lambda = 0^{\mu},55$ (λ du jaune moyen).

Le pouvoir séparateur diminue quand *d* augmente (1). Comme ε diminue avec λ, le pouvoir séparateur sur une image photographique est plus grand que par vision directe à travers l'objectif.

POLARISATION

572. Polarisation par double réfraction. — Un rayon de lumière solaire, transmis à travers un *rhomboèdre de spath d'Islande* donne deux rayons réfractés (**500**). Reçus sur un écran, ces deux rayons réfractés donnent des images *également brillantes* qui ne varient pas d'intensité quand on fait tourner le cristal birefringent autour du rayon lumineux incident. La même égalité d'éclairement des deux images s'observe si les rayons incidents proviennent des nuées ou d'une lampe.

Dans certaines circonstances, les images données sur un écran par les deux rayons réfractés *varient d'intensité* quand on fait tourner le cristal biréfringent autour du rayon incident.

La lumière solaire et les lumières qui donnent deux faisceaux réfractés constamment égaux, sont appelées lumières ***naturelles***. Dans le cas où les deux faisceaux réfractés varient d'intensité, la lumière qui les a fournis en tombant sur le rhomboèdre est appelée lumière ***polarisée***.

La polarisation est dite ***totale*** quand chacun des deux rayons réfractés qui proviennent du dédoublement du faisceau incident, passe par deux ***extinctions***, à 90° l'une de l'autre, pour une rotation complète du rhomboèdre de spath. La polarisation est dite ***partielle*** si on n'observe, pendant la rotation, que des variations d'intensité pour chacun des deux rayons réfractés, sans extinction.

La lumière polarisée se rencontre fréquemment. Toute lumière naturelle, après réflexion (**450**) ou réfraction, est habituellement partiellement polarisée; après double réfraction d'une lumière naturelle, chacun des deux rayons réfractés est totalement polarisé.

573. Étude d'un rayon polarisé. — On sait qu'un rhomboèdre de spath qui reçoit de la lumière naturelle donne deux rayons réfractés :

---

(1) On ne peut pas trop grandir le diamètre de l'objectif, pour ne pas faire croître en même temps l'aberration de sphéricité. On reconnaît expérimentalement qu'un objectif de 12 centimètres de diamètre sépare deux étoiles dont la distance angulaire est de 1″ (*dédouble la seconde*). On compare l'œil à un objectif d'un diamètre égal à celui de la pupille. En admettant que le diamètre utile de la pupille est 2 millimètres (un soixantième de 12 centimètres), le pouvoir séparateur de l'œil est 60″ ou 1′. ($12 \times 5 = 60$).

un *rayon ordinaire* et un *rayon extraordinaire*. Chacun d'eux est polarisé totalement. Le rhomboèdre qui les fournit est dit *polariseur*. Si le rhomboèdre polariseur est épais, et le faisceau incident suffisamment étroit, on peut arrêter tour à tour l'un des deux faisceaux réfractés par un écran pour étudier l'autre.

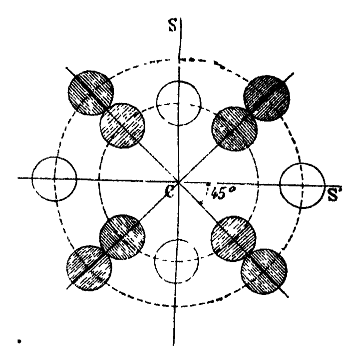


Fig. 669.

Reçu sur un second rhomboèdre de spath, *un rayon polarisé*, qu'il soit ordinaire ou extraordinaire, *se dédouble en deux rayons d'inégale intensité*. La lumière qui tombe sur le second rhomboèdre est donc polarisée; ce rhomboèdre est dit **analyseur**. Si les sections principales du polariseur et de l'analyseur font entre elles un angle α, le rayon incident polarisé, d'intensité I, donne après son passage à travers l'analyseur deux images dont les intensités sont $I \cos^2\alpha$ et $I \sin^2\alpha$ (**loi de Malus**). L'une des deux images disparaît pour $\alpha = 0$ et l'autre pour $\alpha = 90°$; les deux images sont égales pour $\alpha = 45°$ (fig. 669). La somme $I (\sin^2\alpha + \cos^2\alpha)$ des intensités des deux images est constamment égale à l'intensité I du faisceau incident.

Vibrations transversales. — Fresnel a interprété les phénomènes de polarisation en admettant que les vibrations lumineuses sont **transversales**, c'est-à-dire *perpendiculaires à leur direction de propagation*.

Dans un rayon *polarisé totalement*, tel que le rayon ordinaire ou le rayon extraordinaire d'un rhomboèdre de spath, les vibrations sont *rectilignes, perpendiculaires à la direction* CM *de propagation* et se maintiennent dans un azimut unique telle que *aa'* (fig. 670). La polarisation totale est encore dite polarisation *rectiligne*.

Dans un rayon de *lumière naturelle*, les vibrations transversales sont rectilignes et ont lieu, pendant un temps extrêmement court, dans toutes les

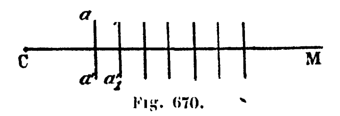


Fig. 670.

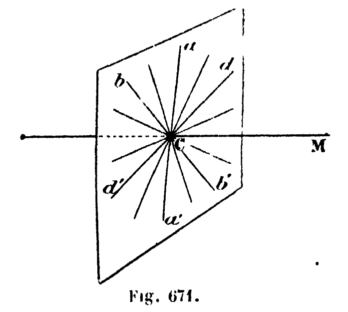


Fig. 671.

directions, suivant *aa'*, *bb'*, *cc'*...., *sans direction privilégiée* (fig. 671). La lumière naturelle ressemble à de la lumière polarisée dont la vibration tournerait avec une grande rapidité autour de la direction de propagation.

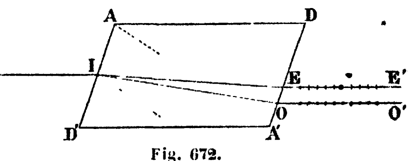
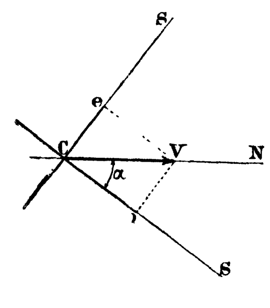


Fig. 672.

Si l'on prend pour *plan*

d'incidence une section principale d'un rhomboèdre de spath, les deux rayons réfractés restent dans le plan d'incidence (**501**), ils sont tous les deux polarisés, les vibrations du rayon ordinaire *oo'* sont perpendiculaires à la section principale, les vibrations du rayon extraordinaire EE' ont lieu dans la section principale (fig. 672).

574. Décomposition mécanique des vibrations. — Les variations d'intensité des deux rayons qui proviennent du dédoublement d'un rayon polarisé par un analyseur biréfringent (rhomboèdre de spath), s'expliquent par une *décomposition mécanique du mouvement vibratoire* à l'entrée de l'analyseur. Une vibration polarisée, rectiligne, passe sans décomposition, si elle est orientée dans la section principale de l'analyseur ou dans un plan perpendiculaire à cette section. Si elle est oblique à ces directions, *elle se décompose en deux composantes*, l'une dans la section principale et l'autre dans la section perpendiculaire.



Supposons le rayon lumineux incident, *polarisé*, projeté en C sur un plan perpendiculaire à sa direction de propagation (fig. 673). Sur ce plan, CS et CS' sont les traces de la section principale du rhomboèdre analyseur et de sa section perpendiculaire.

La vibration incidente est dirigée suivant CV, CV est l'amplitude ou l'écart maximum du mouvement vibratoire polarisé incident. A son entrée dans l'analyseur, la vibration CV se décompose en deux composantes, l'une C*e*, dirigée suivant CS, formant l'image extraordinaire de l'analyseur; l'autre C*o*, dirigée suivant CS', forme l'image ordinaire de l'analyseur.

$$Co = CV \cos \alpha \qquad Ce = CV \sin \alpha.$$

Les intensités des deux images, $CV^2 \cos^2\alpha$ et $CV^2 \sin^2\alpha$ sont entre elles comme $\cos^2\alpha$ et $\sin^2\alpha$ (*loi de Malus*). L'image extraordinaire s'annule pour $\alpha = 0$ et $\alpha = 180°$, l'image ordinaire pour $\alpha = 90°$ et $\alpha = 270°$. Les deux images sont égales à 45° des positions précédentes (fig. 669).

Lorsque la lumière incidente est *naturelle*, les vibrations ayant lieu dans toutes les directions, sans direction privilégiée, la somme des projections suivant CS et suivant CS' est la même pour un temps extrêmement court, aussi les intensités des images sont toujours égales.

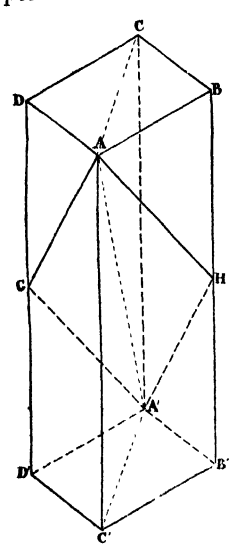


Fig. 674.

575. Prisme de Nicol. — Comme la séparation des deux faisceaux d'un rhomboèdre exige une grande épaisseur de cristal, on emploie des polariseurs qui ne laissent sortir qu'un des deux rayons réfractés. Cette condition est remplie par le prisme de Nicol.

Un prisme de Nicol est un *rhomboèdre allongé* de spath, scié suivant

un plan AGA'H perpendiculaire à la section principale ACA'C' (fig. 674). Les deux moitiés sont recollées, suivant le plan AGA'H, avec du baume de Canada dont l'indice est intermédiaire entre l'indice ordinaire 1,65 et l'indice extraordinaire 1,48 du spath d'Islande.

Un rayon incident SI, parallèle aux longues arêtes du prisme, se divise en un rayon ordinaire IO et un rayon extraordinaire IE qui restent tous

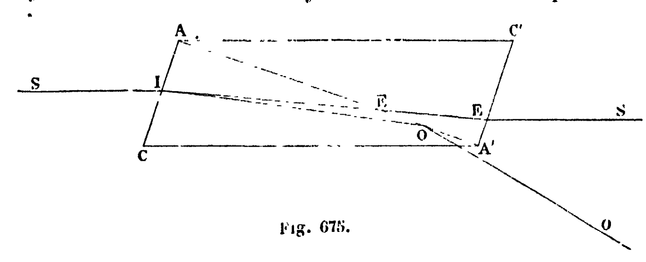


Fig. 675.

les deux (**501**), dans la section principale ACA' (fig. 675). Sur la surface de section AA', le rayon IE n'éprouve qu'un déplacement insignifiant, sans déviation, en traversant la très faible épaisseur de baume. *Le rayon ordinaire*, dont l'indice est inférieur à celui du baume, *se réfléchit totalement* en O sur le baume, si la section AA' est suffisamment oblique et *se trouve rejeté latéralement* en OO'.

Un Nicol est un **polariseur**, car il donne une vibration unique, orientée dans sa section principale. *Il peut servir d'analyseur*, car si, en le faisant tourner, on amène sa section principale à être perpendiculaire à la vibration d'un rayon polarisé incident, ce rayon est complètement éteint par le Nicol, comme le serait un rayon ordinaire.

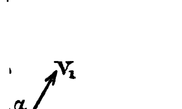
576. Nicols croisés. — Lorsqu'une lumière incidente, polarisée par un premier prisme de Nicol est reçue sur un second prisme de Nicol servant d'analyseur, on n'a qu'une image. En effet, pour toute position de la section principale de l'analyseur, la composante ordinaire CV cos α est réfléchie totalement, la composante extraordinaire CV sin α passe seule. Elle s'annule elle-même et, il y a alors *extinction* complète, pour $\alpha = 0$. Les sections principales CN et CS (fig. 673) des deux Nicols sont alors perpendiculaires.

Détermination de la direction d'une vibration. — La lumière polarisée est reçue sur un Nicol analyseur. On fait tourner la section principale du Nicol analyseur jusqu'à ce qu'il y ait extinction. Lorsqu'elle a lieu, *la section principale de l'analyseur est perpendiculaire à la vibration.*

577. Polarisation rotatoire. — Les cristaux de quartz, taillés *perpendiculairement à l'axe*, et un grand nombre de liquides de nature organique (essence de térébenthine, solutions de sucre, etc...) ont la propriété de faire tourner une vibration polarisée qui les traverse.

Lumière monochromatique. — Un faisceau de lumière parallèle qui traverse deux Nicols croisés est éteint à la sortie du second Nicol. Lorsque, en opérant avec une lumière monochromatique, on interpose entre les deux Nicols une lame de quartz taillée perpendiculairement à l'axe, la lumière *qui avait disparu reparait* à la sortie du Nicol analyseur. Mais

on produit de nouveau l'extinction en faisant tourner le Nicol analyseur, de CN' en CN'_1, d'un angle α (fig. 676). En traversant le cristal de quartz, la vibration sortie du Nicol polariseur avait donc tourné de cet angle α.



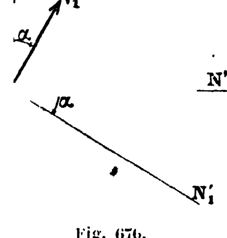


Fig. 676.

Pour une lumière d'une réfrangibilité donnée, *la rotation est proportionnelle à l'épaisseur de la substance active*(1). En prenant des épaisseurs qui produisent des rotations inférieures à 180°, le sens de la rotation est, pour un observateur qui reçoit le rayon à la sortie de l'analyseur, le sens dans lequel on a tourné l'analyseur pour reproduire l'extinction. Certaines substances font tourner la vibration à droite (elles sont *dextrogyres* comme la solution du sucre de canne) et d'autres font tourner la vibration à gauche (elles sont *lévogyres* comme l'essence de térébenthine) (2).

Lumière blanche. — En opérant avec une lumière blanche, le faisceau qui sort de l'analyseur est *coloré;* il ne s'éteint plus, sa teinte change seulement quand on tourne l'analyseur. Ces particularités s'expliquent par la décomposition mécanique des vibrations.

Dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation d'un faisceau incident de lumière polarisée (fig. 677), figurons : 1° un rayon projeté en C; 2° la trace CV de la vibration incidente; 3° la trace CN' de la section principale d'un Nicol analyseur. Les vibrations de diverses réfrangibilités qui constituent la vibration blanche polarisée et qui ont toutes la direction CN à l'entrée, *tournent d'angles différents* (2) en traversant le quartz interposé entre les deux Nicols. *La rotation croît avec la réfrangibilité* de la radiation incidente (de CN à CR pour le rouge, de CN à CJ pour le jaune, de CN à CV pour le violet). A la sortie du quartz, l'image extraordinaire que laisse passer le Nicol analyseur contient des proportions des diverses couleurs qui ne sont plus leurs proportions en lumière blanche, car les projections des amplitudes sur la section principale CN' de l'analyseur sont inégalement réduites par la dispersion angulaire des vibrations.

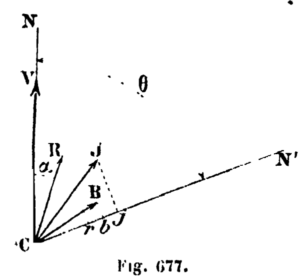


Fig. 677.

$$Cr = CR\cos(\theta - \alpha_1),\quad Cj = CJ\cos(\theta - \alpha_2),\quad Cv = CV\cos(\theta - \alpha_3).$$

Le faisceau émergent est coloré. L'intensité du faisceau total est la somme des intensités des faisceaux de différentes couleurs.

$$I_e = \Sigma\, R\cos^2(\theta - \alpha_1).$$

Si l'une des vibrations, après sa rotation par le cristal de quartz, devient

(1) La rotation produite par un millimètre de quartz est de 18° pour le rouge moyen, de 21°7 pour la raie D, de 24° pour le jaune moyen, de 44° pour le violet moyen.

(2) Les échantillons de quartz sont tantôt dextrogyres, tantôt lévogyres et, pour une même épaisseur, l'angle de rotation est le même dans les deux cas.

perpendiculaire à CN′, la radiation correspondante manque dans la lumière qui sort de l'analyseur.

578. Mesure des pouvoirs rotatoires. — La valeur du pouvoir rotatoire et son sens caractérisent un grand nombre de substances.

La rotation produite par une dissolution d'un corps actif *est proportionnelle à la masse de substance dissoute dans l'unité de volume* de la dissolution et à la longueur de la colonne traversée par la lumière, polarisée. On en déduit une méthode rapide d'analyse, qui est appliquée en particulier, à la recherche de la *richesse en sucre* des substances sucrées. Les parties essentielles des appareils employés sont un Nicol polariseur et un Nicol analyseur; ces appareils s'appellent *saccharimètres* et *polarimètres*.

HISTORIQUE

Vitesse de la lumière. — La vitesse de la lumière a d'abord été mesurée par des procédés astronomiques, au XVIIe siècle, par *Rœmer* en France et par *Bradley* en Angleterre. *Fizeau*, en 1849, mesura par une méthode physique le temps que met la lumière à parcourir 17 kilomètres. *Foucault*, en 1850, parvint à mesurer le temps de propagation de la lumière dans l'air et dans l'eau pour une longueur de quelques mètres.

Réflexion. — Les miroirs métalliques plans furent employés à une époque très ancienne; il en est de même des miroirs concaves, ou miroirs ardents; les lois de la réflexion de la lumiere sont formulées dans un ouvrage d'*Euclide* (300 av. J.-C.).

Réfraction. — *Ptolémée* d'Alexandrie (au 2e siècle) paraît avoir reconnu que, pour de petits angles d'incidence, il y a proportionnalité entre l'angle d'incidence et l'angle de réfraction. Cette loi permit à *Képler* d'établir la théorie physique de l'œil, la théorie des lentilles et le fonctionnement de la lunette astronomique (1611). *Descartes* a énoncé la loi exacte de la réfraction : il en a déduit l'explication de l'arc-en-ciel.

Instruments d'optique. — L'usage des besicles remonte au XIIIe siècle, mais la connaissance des propriétés des lentilles ne fut bien acquise qu'après les travaux de *Galilée* et de *Képler*. Vers 1570, *Porta* fit usage de lentilles biconvexes pour obtenir dans la chambre noire des images nettes des objets extérieurs. La lunette et le microscope composé, construits à la fin du XVIe siècle, sont attribués à *Zaccharias Janssen*, fabricant de besicles à Middelbourg. Ce n'est qu'après la découverte des lentilles achromatiques par l'opticien anglais *Dollond*, en 1757, et après de nouveaux progrès dans la fabrication des verres, que la lunette et le microscope ont été amenés à la perfection que nous leur connaissons.

L'appareil de projection (lanterne magique), est dû au *P. Kircher* (1645).

Les miroirs ayant été fabriqués avant les lentilles, les télescopes ont précédé les lunettes. *Newton* construisit un télescope qui est le type des appareils modernes. *Foucault* a remplacé le miroir métallique par un miroir de verre argenté et le miroir sphérique par un miroir parabolique.

Dispersion. — Depuis longtemps, on avait observé les couleurs irisées que donnent les rayons solaires en traversant un prisme de verre. Vers 1670, *Newton* déduisit de ce phénomène que la lumière blanche est due à la superposition de rayons colorés de diverses réfrangibilités. Au commencement du XIXe siècle, l'opticien *Fraunhofer*, à l'aide d'instruments qu'il avait construits avec une grande perfection, classa les raies du spectre solaire. L'analyse spectrale est due à *Kirchhoff* et *Bunsen* (1859), l'explication des raies solaires à *Kirchhoff*.

Photographie. — La découverte de la photographie revient à *Niepce* et à *Daguerre*. L'action de la lumière sur les sels d'argent était connue à la fin du XVIIIe siècle; *Nicéphore Niepce* produisit le premier, en 1814, une épreuve photographique permanente. En 1891, le problème de la reproduction des objets avec leurs couleurs a été résolu par *Lippmann*. En 1895, l'étude des rayons X émis par les tubes de Crookes et la transparence, pour ces radiations, d'un grand nombre de corps opaques (étoffes, cuir, muscles) ont étendu les applications de la photographie (photographie du squelette à travers les muscles et les viscères, etc.).

Optique physique. — Les interférences lumineuses ont été reconnues par *Young* qui en a donné l'explication. *Fresnel* a réalisé de brillantes dispositions expérimentales du phénomène et a complété la théorie des interférences par sa théorie de la diffraction.

La ***double réfraction***, d'abord reconnue par *Bartholin*, a été étudiée par *Huygens* et surtout par *Fresnel*.

La découverte de la ***polarisation*** appartient à *Malus*, son interprétation mécanique et ses merveilleux développements sont l'œuvre de *Fresnel*.

ÉLECTRICITÉ STATIQUE

PHÉNOMÈNES GÉNÉRAUX

579. Électrisation par le frottement. — Un bâton de verre ou de résine frotté avec une étoffe de laine attire les corps légers : barbes de plumes, fragments de papier, feuilles d'or (fig. 680). L'attraction diminue rapidement si la distance augmente.

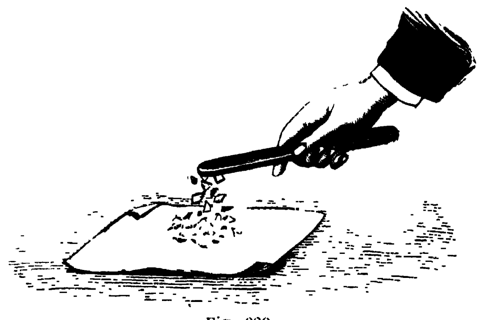


Fig. 680.

On appelle **électricité** la cause du phénomène. Le verre et la résine frottés sont dits *électrisés* (1).

Quand on frotte avec une étoffe de laine, en les tenant à la main, un morceau de bois ou une tige de métal, le corps frotté n'attire pas les corps légers.

580. Bons conducteurs. Mauvais conducteurs. — En réalité, tous les corps sont électrisables par le frottement, mais leur façon différente de se comporter les fait distinguer en *bons* et en *mauvais conducteurs.*

Sur les mauvais conducteurs tels que le verre, la résine, la propriété électrique *reste localisée aux points frottés,* qui attirent seuls les corps légers. Elle disparaît si on touche avec la main les points mêmes où elle a été développée.

Sur les bons conducteurs tels que les métaux, le corps humain, le

(1) Cette propriété attractive a été observée d'abord par les Grecs en frottant l'ambre jaune, qu'ils nommaient *électron.*

sol, la propriété électrique ne se limite pas aux points frottés, mais *se communique immédiatement à toute leur étendue*. L'électricité d'un bon conducteur disparaît si un contact avec le sol est établi en un quelconque de ses points.

Isolants. — Un bon conducteur *doit être entouré par de mauvais conducteurs* pour être électrisé. Les mauvais conducteurs sont appelés **isolants**. Un morceau de métal tenu à la main ne s'électrise pas par le frottement; mais il peut s'électriser s'il est tenu par un manche en verre, car le verre et l'air qui l'entourent sont de mauvais conducteurs. Le frottement le rend alors capable d'attirer les corps légers. Si tous les corps étaient bons conducteurs, l'électricité ne pourrait être retenue et étudiée.

CORPS BONS CONDUCTEURS	CORPS MAUVAIS CONDUCTEURS
Métaux.	Air et gaz.
Charbon de cornue.	Soufre.
Eau commune.	Paraffine.
Solutions aqueuses de sels ou d'acides.	Verre.
Cordes de chanvre.	Résines.
Liège.	Caoutchouc.
Corps des animaux.	Soie.
Sol.	Essence de térébenthine
Gaz raréfiés.	Vide parfait.

581. Pendule électrique. — On utilise, pour une première étude de l'électricité, le pendule électrique, petite balle conductrice de moelle de sureau B, suspendue à un support de verre C par un fil de soie isolant (fig. 681). Comme il est plus aisé d'écarter de la verticale un corps soutenu par un fil que de le soulever, le pendule électrique est employé avec avantage pour reconnaître l'attraction par un corps électrisé.

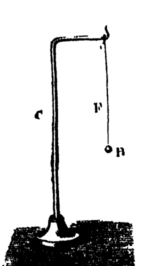


Fig. 681.

Communication d'électricité par contact. — Quand on touche avec un corps, électrisé par frottement, un cylindre de métal supporté par une colonne isolante, le cylindre attire à son tour les corps légers par toute sa surface. Si le cylindre électrisé est alors mis en contact avec un second cylindre, les deux cylindres sont électrisés; mais l'attraction d'un pendule par le premier est moindre qu'avant son contact avec le second. L'attraction devient inappréciable lorsque le second cylindre a de grandes dimensions; elle disparaît par une communication avec le sol. Pour la commodité du langage, assimilant l'électricité à un fluide, on dit qu'elle *se répand* sur un conducteur et qu'elle *s'écoule* dans le sol.

582. Deux espèces d'électricités. — Il y a deux espèces d'électricités : celle du *verre frotté* et celle de la *résine frottée.*

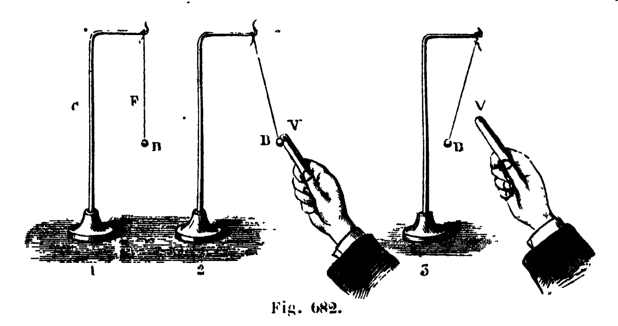


Fig. 682.

Chargés d'une même électricité, deux corps se repoussent; chargés d'électricités différentes, ils s'attirent.

Remplaçons, en effet, la balle de sureau du pendule électrique par un petit cylindre de *verre* électrisé. Ce cylindre est repoussé par un bâton de verre frotté, attiré par un bâton de résine frotté.

Un petit cylindre de *résine* suspendu à son tour au fil de soie du pendule et électrisé est repoussé par la résine et attiré par le verre.

C'est le plus souvent avec un pendule électrique qu'on démontre l'existence des deux électricités et leurs propriétés.

A la balle de sureau B on présente un bâton de verre frotté V (fig. 682_2) : d'abord vivement attirée, la balle vient en contact avec le verre, y adhère un instant, s'électrise comme lui par contact, puis est ensuite vivement repoussée (fig. 682_3) ; mais, à cet état, elle est attirée par la résine frottée.

En touchant avec le doigt la balle de sureau électrisée par le verre, on la décharge. Si l'on approche alors la résine, la balle est attirée, puis repoussée après le contact ; mais, à ce moment, le verre l'attire.

Double pendule. Électroscope. — On forme un double pendule avec deux *fils de lin conducteurs,* fixés à un support *isolant* et soutenant chacun une balle de sureau (fig. 683). Électrisées par contact avec le verre frotté, les balles *b* et *b'* prennent une même électricité et se repoussent, mais la résine les attire.

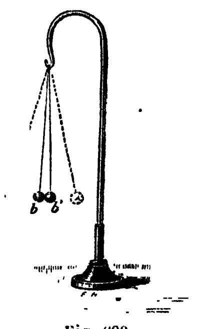


Fig. 683.

La sensibilité du double pendule est accrue si on le forme d'une tige métallique portant deux feuilles d'or à son extrémité inférieure. Les feuilles divergent en se repoussant si on touche la tige métallique avec un corps électrisé. L'appareil prend alors le nom d'*électroscope* (fig. 690).

Il n'y a que deux espèces d'électricités. En effet, tout corps

électrisé se comporte soit comme le verre, soit comme la résine.

Quantités d'électricité égales. — Deux sphères métalliques S et S′, soutenues par des supports isolants et chargées *d'une même électricité,* sont dites contenir des *quantités* ou *charges* ou *masses* électriques égales, si elles exercent séparément, à la même distance, une même attraction sur un pendule.

Une charge électrique est une *grandeur mesurable,* car, non seulement on définit deux charges égales, mais aussi une charge double, triple d'une autre. On dit qu'une sphère S a une charge double, triple de celle d'une sphère S′ si l'action de S sur un pendule est deux, trois fois plus grande que l'action de S′, à la même distance.

Électricités positive et négative. — Supposons deux sphères chargées d'*électricités différentes* et exerçant séparément, à une même distance, des attractions égales sur la balle d'un pendule électrique. Quand on met les deux sphères en contact, leurs électricités disparaissent comme des quantités *numériquement égales,* l'une positive, l'autre négative, qui s'annulent en s'ajoutant. *On appelle* **positive** l'électricité développée avec la laine sur le verre poli, et **négative** l'électricité développée de la même façon sur la résine.

583. Développement simultané des deux électricités. — *Une des deux électricités ne se développe jamais sans qu'il apparaisse en même temps une quantité égale d'électricité contraire.* Pour le montrer, on frotte l'un contre l'autre deux disques A et B, l'un de verre, l'autre de bois recouvert de drap et soutenu par un manche isolant (fig. 684). Le verre se charge d'électricité positive, le drap d'électricité négative. Après la séparation, chacun des disques attire la balle d'un pendule électrique. Si cette balle a été préalablement électrisée positivement, le disque de verre la repousse; le disque de drap l'attire. Le corps frotté et le corps frottant sont donc chargés d'électricités de signes contraires. Si les disques, maintenus en contact, sont présentés par leur tranche à un pendule électrique, ils n'exercent aucune attraction. L'égalité de leurs charges sera démontrée plus loin d'une façon rigoureuse (**590**).

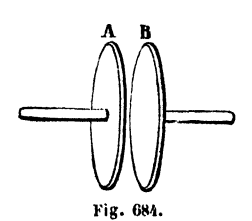


Fig. 684.

Le signe de la charge dépend de la nature des corps frottés.

Une des deux électricités ne disparaît jamais sans qu'il disparaisse en même temps une quantité égale de l'autre [1].

---

(1) Une charge électrique n'existe pas plus seule qu'un pôle magnétique.

État neutre. — Un corps non électrisé ou *neutre* se comporte comme s'il contenait des quantités égales d'*électricité positive* et d'*électricité négative* préexistantes. Ces deux électricités se séparent sous diverses influences.

584. L'électricité se porte à la surface extérieure des conducteurs. — Un *conducteur* électrisé n'est chargé qu'à sa surface *extérieure;* l'intérieur est neutre. En voici plusieurs preuves :

1° *Conducteur creux.* — On électrise une sphère métallique creuse isolée, S, présentant une petite ouverture (fig. 685); on introduit dans la cavité un petit conducteur *e*, porté par une tige de paraffine, et on établit son contact avec la surface interne. Le conducteur *e* est ensuite retiré, en ayant soin de ne pas toucher les bords de l'ouverture; *il n'est pas électrisé,* car il n'agit pas sur un pendule; il s'électrise quand il touche la surface extérieure.

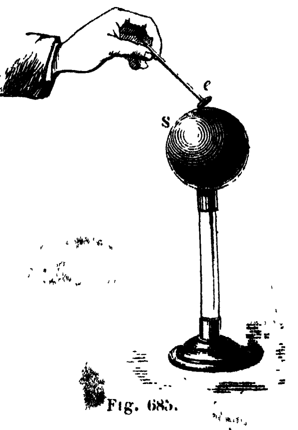


Fig. 685.

Si la sphère creuse est neutre, et le corps *e*, qu'on introduit intérieurement, électrisé, il cède par contact son électricité qui *passe entièrement à la surface extérieure* de la sphère (1).

2° *Hémisphères creux.* — Une sphère métallique A, isolée par un fil de soie *f*, est électrisée et recouverte avec deux hémisphères creux B et C, de plus grand diamètre, portés par des manches isolants (fig. 686). On soulève les hémisphères de façon à leur faire toucher la sphère, on les abaisse ensuite légèrement, et on les sépare sans toucher cette fois la sphère. Ils sont alors électrisés tous les deux, car ils attirent un pendule électrique, et la sphère intérieure n'est plus électrisée, car les hémisphères formaient, au moment du contact, la surface extérieure d'un conducteur unique composé des hémisphères et de la sphère.

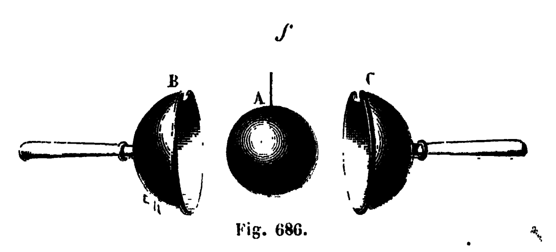


Fig. 686.

(1) S'il y avait eu contact, *extérieurement*, entre *e* et S, il y aurait eu partage entre les surfaces de *e* et de S. Quand le contact a lieu *intérieurement* l'électricité de *e* passe entièrement sur S, quelle que soit la forme du conducteur creux S.

3° *Cage métallique.* — Sur un support isolant on pose une cage en fils métalliques munie de doubles pendules à l'intérieur et à l'extérieur et on l'électrise fortement. Les doubles pendules extérieurs divergent, les pendules intérieurs restent verticaux.

Puisque l'électricité n'existe qu'à la surface externe, un conducteur creux s'électrise comme s'il était plein, une boule de soufre recouverte d'une feuille d'or comme une boule métallique pleine, un plateau de verre recouvert d'étain comme un plateau métallique.

INFLUENCE ÉLECTRIQUE

585. Champ électrique. — Un champ électrique est un espace dans lequel s'exercent des forces électriques; dans cet espace, la balle d'un pendule électrique est sollicitée à se mouvoir. Un champ électrique est créé par un ou plusieurs corps électrisés.

Influence. — Un *conducteur introduit dans un champ électrique s'électrise.* Ce mode d'électrisation, sans contact, par *influence,* est appelé *induction électrostatique.* Le système électrisé influençant est dit **inducteur.** Le corps influencé est l'**induit.**

Les parties de l'induit, qui sont voisines de l'inducteur, prennent une électricité contraire à celle de l'inducteur; les parties les plus éloignées prennent une électricité de même signe. *Les deux charges induites,* de signes contraires, *sont égales.*

Expérience. — Si d'une sphère métallique S, isolée et chargée, par exemple positivement, on approche un cylindre métallique AB isolé et à l'état neutre, le cylindre *s'électrise* (fig. 687).

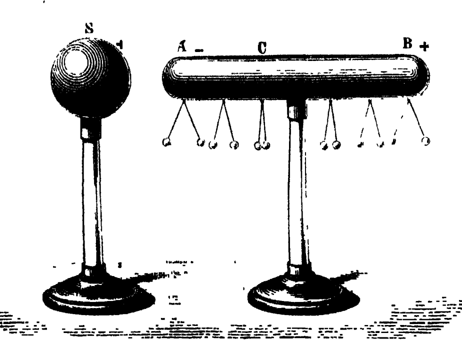


Fig. 687.

Si le cylindre porte des doubles pendules, formés de balles de sureau suspendues à des fils conducteurs, ces pendules divergent. L'extrémité A, *la plus voisine de la sphère,* présente une électricité de *signe contraire à celle de l'inducteur,* car un bâton de résine frotté repousse le pendule de l'extrémité A. Le bâton de

résine attire le pendule de l'extrémité B; la partie *la plus éloignée de l'inducteur est donc électrisée comme lui.*

Si l'on éloigne la sphère S ou si on la décharge, en la touchant avec le doigt, tous les pendules du cylindre retombent. Les électricités opposées, induites sur le cylindre, *étaient en quantités égales* puisqu'elles se sont neutralisées complètement quand l'influence a cessé (la charge *totale* était *nulle*).

Les charges développées par influence augmentent lorsque la charge de l'inducteur augmente et que sa distance à l'induit diminue.

Quand, à la suite du cylindre, on en place, à distance, d'autres également isolés, ils s'électrisent tous par influence et *dans le même sens*. Leur électricité disparaît si on éloigne l'inducteur.

L'influence s'exerce sur un corps électrisé comme sur un corps neutre : l'électricité induite s'ajoute en chaque point à celle que possède déjà le conducteur influencé.

Interprétation. — On peut dire que l'électricité inductrice sépare sur l'induit des quantités *égales* (1) d'électricités de signes contraires. L'électricité négative est attirée en A sur l'extrémité la plus voisine de S, l'électricité positive apparaît seule en B, à l'extrémité la plus éloignée de S. L'équilibre s'établit en un temps extrêmement court.

Communication de l'induit avec le sol. — Si l'on prolonge le cylindre induit AB par un autre cylindre, la divergence du pendule augmente en A. Quand on réunit au sol (fig. 688) *un point quelconque*, même voisin de l'inducteur, du cylindre AB pendant l'influence, l'électricité positive va au sol et le pendule de l'extrémité B tombe. L'électricité négative *persiste* seule en A, où elle est maintenue par l'attraction de l'électricité de la sphère et la divergence du pendule qui s'y trouve augmente.

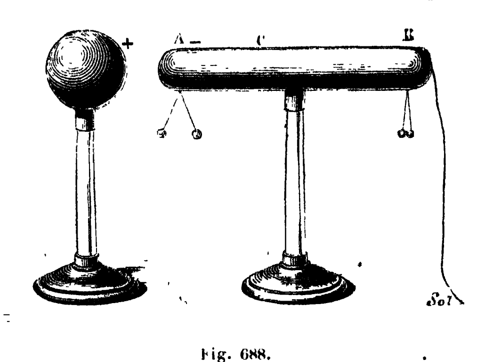


Fig. 688.

586. Charge par influence. — Si l'on supprime, *pendant l'influence,* la communication du cylindre avec le sol et si on éloigne

(1) Puisque l'une des électricités n'apparaît jamais sans une quantité égale de l'autre.

ensuite la sphère inductrice, l'électricité négative qui subsiste seule sur le cylindre s'y répand librement; tous les pendules divergent; un bâton de résine frotté les repousse. On a ainsi **chargé par influence** un conducteur isolé, *sans frottement et sans contact*, avec un inducteur dont la charge est restée constante. L'induit a pris une *électricité contraire à celle de l'inducteur*.

Charge par contact. — La sphère positive S et le cylindre C chargé par influence, étant en présence, si on approche C de S jusqu'au contact, *une partie* seulement de l'électricité positive de S est neutralisée par l'électricité négative de C et l'ensemble, sphère et cylindre, se trouve positif. La charge totale est celle de la sphère S. Le cylindre, éloigné, reste positif. *Par contact*, la charge est donc de même signe.

587. Attraction des corps légers. — Une électrisation par influence précède l'attraction des corps légers et l'attraction ne s'exerce qu'entre corps électrisés.

Corps léger à l'état neutre. — ***Corps léger, conducteur et isolé.*** — Présentons un corps M électrisé positivement à la balle de sureau N d'un pendule électrique à fil de soie (fig. 689) : l'électricité positive du corps M produit sur la balle une décomposition par influence : la face tournée vers M est négative, la face opposée positive; la balle mobile est attirée à cause de la plus faible distance de son électricité négative.

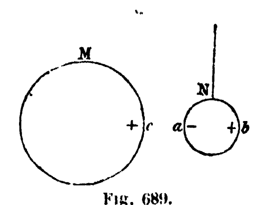


Fig. 689.

Corps léger, conducteur et non isolé. — Si la balle de sureau est soutenue par un fil conducteur fixé à un support métallique, l'électricité positive développée par l'influence du corps M s'écoule dans le sol; l'attraction devient alors plus forte que lorsque la balle est isolée.

Corps léger, mauvais conducteur. — Une décomposition par influence a lieu lentement sur un mauvais conducteur : après quelque temps, le corps inducteur exerce une attraction s'il est suffisamment électrisé.

Corps léger électrisé. — Ce cas sera étudié avec le pendule électrique.

ÉLECTROSCOPES

Les *électroscopes* font connaître l'électrisation d'*un corps et le signe de son électricité*. Un pendule électrique est un électroscope.

588. Pendule électrique. — Un pendule à l'état neutre n'est attiré que par un corps électrisé.

Un pendule isolé (fig. 612), *préalablement chargé d'une électricité connue*, permet de reconnaître l'électricité d'un corps.

Corps électrisé chargé de la même électricité que le pendule. — En

approchant lentement le corps électrisé, il y a répulsion. En continuant à approcher le corps électrisé, il y a, à une petite distance, une décomposition de fluide neutre, la balle mobile se charge par influence d'électricité contraire sur sa face en regard, et elle est attirée. Il y a donc eu *répulsion suivie d'attraction,* l'attraction peut être seule remarquée si le corps électrisé a été vivement approché.

Corps électrisé et pendule chargés d'électricités contraires. — Il y a une attraction, qui *persiste* à petite distance, car une décomposition par influence augmente l'électricité contraire, en regard de la balle mobile.

Pendule électrisé et corps neutre. — Le pendule est toujours *attiré,* car le pendule développe par influence de l'électricité contraire à la sienne sur les parties voisines du corps approché.

Conclusion. — Une attraction du pendule ne fixe pas sur le signe de l'électrisation du corps approché; seule, une *répulsion* suivie d'attraction caractérise une électricité de même signe que celle du pendule.

589. Électroscope à feuilles d'or (fig. 690). — Cet appareil, plus sensible qu'un pendule électrique, se compose d'une tige métallique terminée en haut par un bouton sphérique et en bas par une lame conductrice contre laquelle s'appliquent *deux feuilles d'or battu f, verticales* et très légères. La tige est maintenue, par un bouchon *s* de *soufre* ou de paraffine, dans la tubulure supérieure d'une boîte cylindrique de métal. Cette boîte, portée par un pied *conducteur,* est fermée latéralement par des glaces planes.

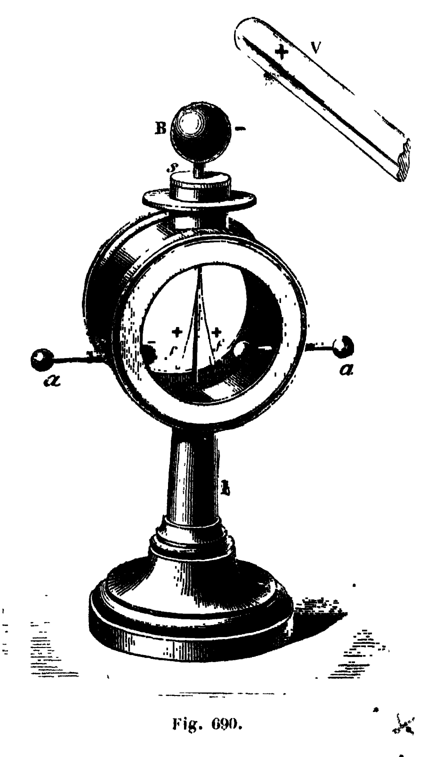


Fig. 690.

Action d'un corps électrisé sur un électroscope. — La *divergence des feuilles,* à l'approche d'un corps, indique que ce corps est électrisé. En effet, quand on approche un bâton de verre frotté V, la boule B de l'électroscope s'électrise par influence, l'électricité négative est attirée sur la boule, l'électricité positive produit une répulsion entre les feuilles et la lame verticale de laiton.

Deux tiges horizontales *a,* terminées par des boules et glissant à frot-

tement dans les parois de la boîte cylindrique, peuvent être rapprochées plus ou moins des feuilles d'or.

Lorsque leur divergence est très forte, les feuilles touchent les tiges de décharge *a*, ce qui les fait communiquer avec le sol et les empêche de se coller sur les parois de l'électroscope. Les tiges de décharge accroissent d'ailleurs la sensibilité, en se chargeant, par l'influence des feuilles, d'une électricité contraire dont l'attraction augmente la divergence.

Détermination du signe de l'électricité d'un corps électrisé. — On commence par *charger l'électroscope* d'une électricité connue.

Charge de l'électroscope. — On pourrait le charger par contact avec un corps électrisé. Habituellement, pour éviter de déchirer les feuilles par une charge trop forte, on procède par influence.

Pour une charge *négative*, on approche de l'électroscope un bâton de verre frotté : les feuilles divergent, chargées positivement. On touche le bouton avec le doigt **pendant l'influence** : les feuilles tombent, car leur charge positive va au sol. L'électricité négative reste maintenue sur le bouton par l'attraction du verre. On éloigne *d'abord* le doigt, *puis* le verre ; l'électricité négative se répand alors sur tout l'appareil et fait diverger les feuilles.

On aurait chargé, de la même façon, l'électroscope *positivement*, en approchant du bouton un bâton de résine frotté.

Corps chargé comme l'électroscope (par exemple négativement). — On approche lentement le corps électrisé : la *divergence des feuilles augmente.*

En continuant à approcher le corps, une nouvelle décomposition par influence a lieu sur l'électroscope ; l'électricité négative séparée s'ajoute à l'électricité négative des feuilles et *augmente encore la divergence.*

Corps chargé d'électricité contraire (corps positif, électroscope négatif). — On approche lentement le corps : la *divergence diminue.*

En continuant à rapprocher le corps, une décomposition par influence a lieu sur l'électroscope ; l'électricité positive séparée neutralise dans les feuilles l'électricité négative qui les chargeait, les feuilles tombent. Quand l'électricité positive séparée augmente encore, les feuilles *s'écartent de nouveau*, mais par une charge positive. Le rapprochement passe inaperçu si le corps électrisé est présenté vivement à l'électroscope.

Corps neutre. — L'électricité de l'électroscope développe, par influence, une électricité contraire sur les parties voisines d'un conducteur neutre qu'on approche ; cette électricité attire sur le bouton l'électricité de l'électroscope. Les feuilles *se rapprochent.*

Conclusion. — Le signe de l'électricité d'un conducteur résulte, sans

ambiguïté, de la constatation d'un **rapprochement suivi de divergence**. Mais on ne l'observe qu'en approchant, d'abord *de loin et lentement*, le corps de l'électroscope. Pour obtenir cette indication, on charge successivement l'électroscope positivement et négativement.

CYLINDRE DE FARADAY

590. Définition des quantités d'électricité. — Pour la définition des *quantités d'électricité* on utilise la propriété de l'électricité de se porter à la *surface extérieure* des conducteurs (**584**).

1° On prend une enveloppe métallique creuse isolée, telle qu'un cylindre ouvert C (fig. 691). On descend dans la cavité une sphère métallique électrisée A, soutenue par un fil de soie; on établit son *contact* avec la paroi intérieure. La charge passe entièrement *sur la surface extérieure* du cylindre. Si un électroscope E est mis en communication métallique avec le cylindre, ses feuilles divergent.

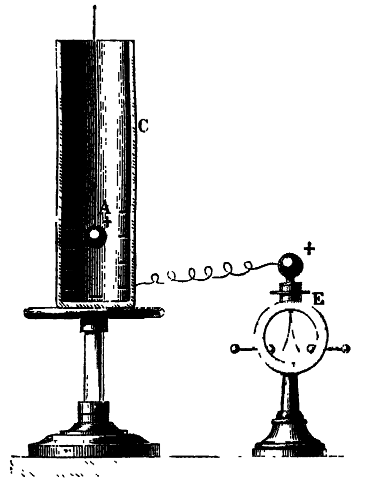


Fig. 691.

On décharge cylindre et électroscope, et l'on recommence l'expérience avec un autre corps électrisé: la charge est la même que la première si l'on obtient la même divergence à l'électroscope. Cette façon de définir *l'égalité de deux charges* est plus précise que la comparaison des actions sur un pendule électrique.

2° Si l'on n'a pas déchargé le cylindre et que l'on introduise un corps électrisé avec la même charge, cette seconde charge passe, après contact, sur la surface extérieure du cylindre et s'ajoute à la première. La nouvelle divergence de l'électroscope correspond à une charge du cylindre dite *double*. En recommençant, on triple, on quadruple la première charge du cylindre.

3° Deux charges de signes contraires sont dites *égales* si elles produisent séparément une même divergence de l'électroscope.

4° La divergence finale est nulle si l'on introduit successivement deux charges égales et contraires.

5° Les charges s'ajoutent algébriquement. Deux charges positives,

égales, successives, suivies d'une troisième égale, mais négative, donnent la même divergence qu'une seule des charges positives.

6° La divergence finale est la même quand *n* conducteurs chargés sont introduits et mis en contact, soit successivement, soit simultanément.

Mesure des quantités d'électricité. — En prenant pour unité la charge d'une sphère A, on *gradue* l'électroscope en introduisant, successivement, des charges égales à celle de A. Les déviations successives de l'électroscope correspondent à des charges 1, 2, 3, 4... On dresse une table ou on trace une courbe.

Pour mesurer, avec cette unité, une charge quelconque, on descend dans le cylindre le corps qui la porte et on établit le contact avec la paroi intérieure. La divergence de l'électroscope gradué fait connaître la charge. On peut donner au cylindre des dimensions suffisantes pour y plonger des corps volumineux.

Unité de quantité. — Pour l'évaluation des charges, on a adopté le **coulomb**. Cette unité, empruntée à l'électricité dynamique, est extrêmement grande par rapport aux quantités d'électricité mises en jeu en électricité statique.

Conservation de l'électricité dans le contact. — Les divergences ne varient pas quand plusieurs conducteurs introduits simultanément dans le cylindre restent indépendants ou sont mis en contact entre eux à l'intérieur du cylindre. La charge totale est donc indépendante du mode de répartition de l'électricité entre les différents corps.

Cas particulier. — On touche une sphère électrisée avec une sphère neutre de même rayon (creuse ou pleine). Si l'on sépare les deux sphères, chacune a une charge moitié moindre. En touchant alors l'une des sphères avec une sphère neutre égale, on réduit la masse au quart, etc.

Égalité des charges développées par le frottement. — On introduit dans le cylindre un bâton de *verre* non électrisé et un morceau de *cuir*, enduit d'or mussif, porté par un manche isolant. On frotte le verre contre le cuir, sans toucher les parois du cylindre; l'électroscope n'est pas dévié tant que les deux corps sont dans le cylindre, quelle que soit leur position relative; en les retirant, tour à tour, on a des divergences égales et contraires.

Dans les opérations précédentes, la sphère électrisée introduite dans le conducteur creux donne lieu, avant le contact avec la paroi intérieure, à des phénomènes d'influence étudiés par Faraday. Pour cette raison, le cylindre employé pour la comparaison des charges électriques est appelé **cylindre de Faraday**.

591. Influence à l'intérieur d'un conducteur fermé. — Le cylindre métallique C, *isolé,* haut et étroit, ouvert en haut, est relié par un fil métallique au bouton d'un électroscope E (fig. 691).

1° On introduit dans le cylindre une boule A, isolée par un fil de soie et électrisée *positivement;* le cylindre se charge par influence, les feuilles de l'électroscope divergent par de l'électricité positive et la divergence augmente d'abord à mesure que la boule descend.

La charge positive de la surface extérieure du cylindre C et de l'électroscope est *égale* à la charge négative de la surface intérieure du cylindre, car, si on retire la boule, toute électrisation du système induit disparaît.

2° Si le cylindre est étroit d'ouverture, la divergence des feuilles de l'électroscope *ne varie plus* quand la boule est *suffisamment descendue* et que l'on continue à la faire descendre; on peut alors considérer le cylindre comme enveloppant complètement la boule. Donc : *la charge développée par influence, dans un conducteur creux fermé, ne dépend pas de la position de l'inducteur.*

3° La boule A ayant été descendue au-dessous du niveau où la divergence de l'électroscope devient constante, si l'on établit le contact de la boule et du cylindre, *la divergence de l'électroscope ne varie pas* (1); elle ne varie pas non plus quand on retire la boule. En outre, la boule retirée du cylindre après le contact, n'est plus électrisée. L'électricité de la boule et l'électricité contraire de la surface interne du cylindre se sont *exactement neutralisées* au contact, car un excès de l'une se porterait sur la surface extérieure du cylindre (**584**) et modifierait la divergence de l'électroscope. Donc : *l'électricité inductrice d'un corps électrisé et l'électricité induite sur les parois d'un conducteur creux sont égales et de signes contraires* (2).

592. Écrans électriques. — I. **Un conducteur enveloppant des charges électriques supprime leur action à l'extérieur.** — La divergence des feuilles de l'électroscope restant la même avant et après le contact de la boule, l'électricité extérieure du cylindre était

---

(1) La divergence de l'électroscope restant la même un peu avant et après le contact, la mesure d'une quantité d'électricité peut se faire *sans toucher* le cylindre avec le corps électrisé qu'on y plonge.

(2) L'égalité des deux électricités se démontre encore d'une façon un peu différente. Le conducteur creux ayant été mis en communication avec le sol, au moment où la boule électrisée intérieure est voisine du fond du cylindre, on supprime la communication avec le sol. On établit ensuite le contact de la boule et du cylindre, en descendant un peu la boule, on constate alors que tout le système est à l'état neutre.

Une salle est assimilable au conducteur creux C. Un conducteur électrisé et isolé, placé dans la salle se comporte comme la boule A de l'expérience de Faraday.

libre, sa distribution ne dépendait pas de la distribution des masses intérieures (charge positive de la boule et charge induite à l'intérieur du cylindre) ni même de leur existence.

Une plaque métallique P, *communiquant avec le sol*, interposée entre un corps électrisé S et un corps conducteur C, diminue considérablement les phénomènes d'influence produits par le corps S sur le conducteur (fig. 692). Par suite de l'influence du corps S, la plaque reliée au sol se charge d'électricité contraire à celle de S; sa charge est inférieure à celle de S, mais en raison de sa moindre distance, elle exerce à peu près la même action sur le cylindre C et neutralise en grande partie l'action de S.

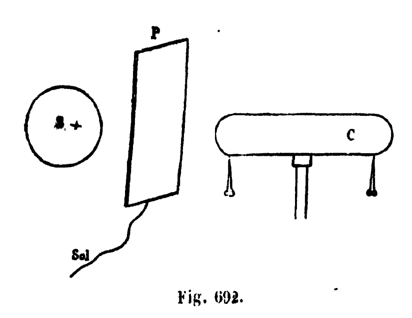


Fig. 692.

Une plaque métallique mince, *isolée*, n'exerce pas d'effet neutralisant appréciable l'influence de S la charge, en effet, d'électricités opposées sur les deux faces; ces charges égales et contraires, se trouvant à la même distance du cylindre, exercent des actions qui s'annulent.

II. Un conducteur enveloppant des charges électriques les protège contre toute action extérieure. — Un corps R, très fortement électrisé, est sans action sur un électroscope recouvert d'une cage métallique C et *ne fait pas varier la divergence* des feuilles si l'électroscope a été préalablement chargé.

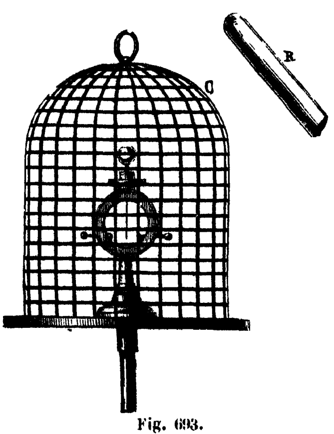


Fig. 693.

Une cage en toile métallique remplit le même rôle d'écran électrique qu'une enveloppe continue (fig. 693).

593. Résumé. — Considérons un corps A, électrisé positivement, placé dans un conducteur creux fermé B. Soit M la charge de A; la charge de la surface interne de B est — M, la charge de la surface externe est + M. Les distributions de — M à la surface interne de B et de + M sur A varient avec la position de A. Quant à la distribution de + M à la surface externe, elle est la même que si les charges intérieures n'existaient pas (fig. 694).

D'autre part, une charge extérieure agit sur la surface externe de B, mais n'agit pas à l'intérieur.

Il y a donc un *champ électrique intérieur* et un *champ électrique extérieur,* complètement *indépendants.* Ces deux champs électriques sont séparés par le conducteur creux.

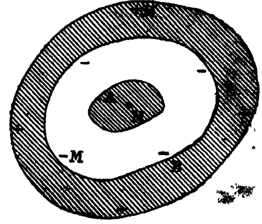


Fig. 694.

La force électrique à l'intérieur d'un conducteur est nulle. — A l'état d'équilibre, un point d'un conducteur creux n'éprouve aucune action des charges intérieures et aucune action des charges extérieures. La force électrique y est donc nulle. Si la cavité n'existe pas, l'action exercée à l'intérieur par des masses électrisées extérieures est encore nulle.

594. Action extérieure d'une couche sphérique uniforme. — Supposons une sphère conductrice S de rayon R, et une enveloppe sphérique concentrique de rayon R' également conductrice. Si la sphère S est électrisée positivement, sa charge + M développe sur la surface interne de la seconde sphère une charge négative égale — M (fig. 695); ces électricités sont, par raison de symétrie, uniformément distribuées sur les deux surfaces sphériques. Ces deux charges se neutralisent sur un point extérieur. Si le rayon de la sphère intérieure diminue indéfiniment, la charge — M exerce une action égale et contraire à celle d'une masse + M placée au centre et, par conséquent, la même action qu'une charge — M placée également au centre; donc une couche sphérique *uniformément distribuée* agit sur un point extérieur comme une masse électrisée égale, concentrée au centre de la sphère.

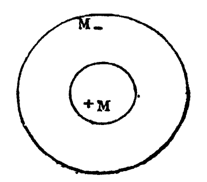


Fig. 695.

595. Diélectriques. — Un corps conducteur interposé intercepte l'influence électrique (**592**). L'influence ne s'exerce qu'à travers les *substances isolantes* qu'on appelle pour ce motif des *diélectriques :* soufre, paraffine, ébonite, mica, verre, benzine, gaz, etc.

FLUX DE FORCE ÉLECTRIQUE

596. Lignes de force. — Une masse électrisée, libre dans un champ électrique, est entraînée par la résultante des forces électriques qui agissent sur elle. On appelle ligne de force *la trajectoire que suivrait une petite masse positive* qui se déplacerait sous l'action de la résultante.

Dans le cas d'une sphère S, chargée uniformément d'électricité positive, une petite masse positive A est repoussée suivant le rayon SA. Les lignes de force sont des *rayons divergents* (fig. 696). Ce sont des *rayons convergents,* si la sphère est négative (fig. 697).

Sur un conducteur électrisé, où l'électricité est en équilibre, les lignes

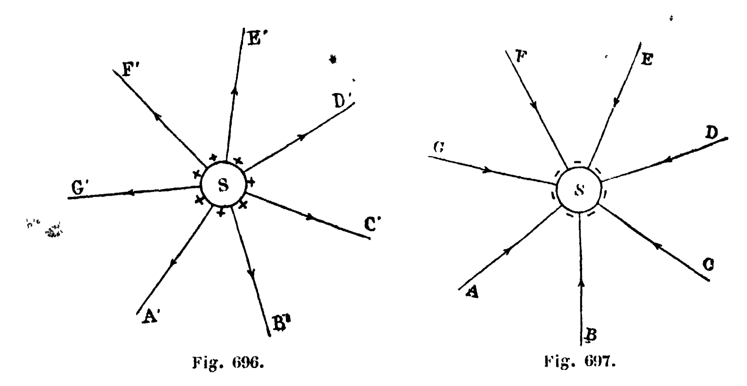


Fig. 696. Fig. 697.

de force sont en chaque point *normales à la surface* du conducteur. Sinon, on pourrait décomposer la force en deux composantes, l'une normale à la surface, l'autre tangente, cette dernière ne serait pas nulle et *déplacerait* l'électricité sur la surface (fig. 701).

Les lignes de force *s'arrêtent à la surface* d'un conducteur, sans pénétrer à l'intérieur, car, à l'intérieur, la force électrique est nulle (**593**).

Dans un champ *uniforme,* où la force a partout la même intensité et la même direction, les lignes de force sont des *droites parallèles.*

Le tracé des lignes de force dans un champ électrique facilite l'interprétation des phénomènes d'influence.

Distribution des lignes de force dans un champ électrique. — ***Conducteur creux.*** — Un conducteur S, électrisé positivement, entouré par une enveloppe métallique C, donne naissance à des lignes de force divergentes ; elles s'arrêtent à la surface interne de l'enveloppe; car, au delà, la force électrique est nulle (fig. 698). Les lignes de force qui partent d'un élément ab de la surface de S vont aboutir en $a'b'$ à une portion de la surface interne du conducteur creux C; les éléments ab et $a'b'$ qui se correspondent, aux deux extrémités du canal formé par les lignes de force, sont chargés d'électricités contraires qu'on démontre être égales.

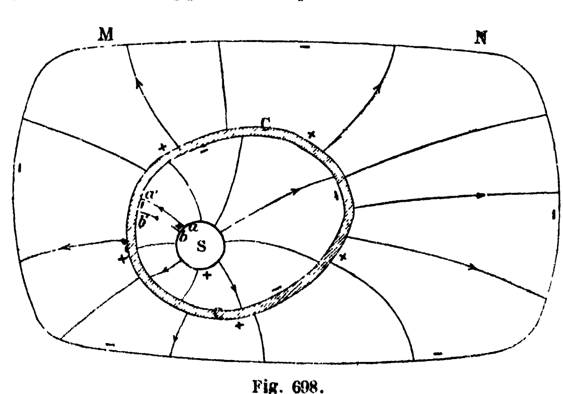


Fig. 698.

Des lignes de force partent de la surface extérieure positive du conducteur creux C, elles vont, à leur tour, aboutir aux parois de l'enceinte MN qui sont chargées négativement.

Cas général. — Lorsque l'inducteur n'est pas entouré par l'induit (par exemple, une sphère inductrice (**585**), et un cylindre induit), les lignes de force vont de l'inducteur à l'induit, de l'inducteur à l'enceinte, et de l'induit à l'enceinte (fig. 699). Une ligne qui émane d'une charge positive aboutit constamment à une charge négative.

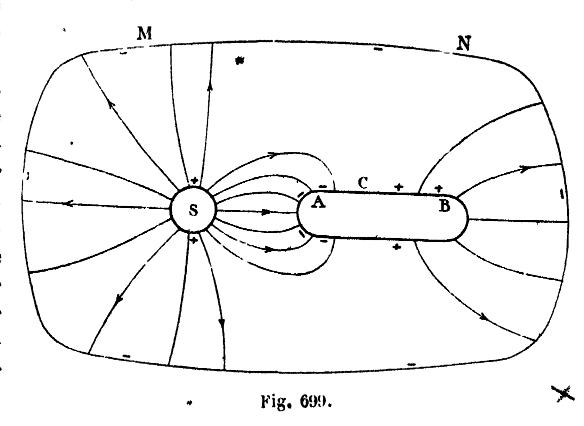


Fig. 699.

LOIS DES ATTRACTIONS ET RÉPULSIONS ÉLECTRIQUES

597. Lois de Coulomb. — Coulomb a étudié les forces qui s'exercent entre deux corps électrisés, *de petites dimensions par rapport à leur distance.* 1° La force varie *en raison inverse du carré de la distance* des deux corps, elle est dirigée suivant la droite qui les joint. A 2, 3... cm., l'action est 4, 9... fois plus petite qu'à un centimètre.

2° L'action mutuelle des deux corps électrisés est *proportionnelle à leurs quantités d'électricité* respectives. Si l'on double l'une des quantités d'électricité, l'action mutuelle devient double ; si l'on double les deux, l'action mutuelle devient quadruple. Les quantités d'électricité en présence ont pu être mesurées avec le cylindre de Faraday.

D'après les deux lois précédentes, l'action f de deux masses électriques m et m', distantes de d, est exprimée, par $f = K' \frac{mm'}{d^2}$.

On peut prendre pour *unité de* quantité d'électricité une charge qui, dans l'air, repousse une charge égale, distante de un centimètre, avec une force égale à une dyne. Cette unité est l'unité de quantité dans le *système électrostatique.* Avec cette unité, $K' = 1$. *L'unité pratique,* appelée *coulomb* (**634**) vaut 3 milliards ou 3.10^9 unités électrostatiques.

Lorsque m et m' sont exprimés en coulombs, d en centimètres, f en dynes, K' vaut dans le vide et dans l'air, $3^2 10^{18}$.

Si les masses sont de même signe, f est positif et la force est répulsive.
Si elles sont de signes contraires, f est négatif et la force est attractive.

DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITÉ

598. Densité électrique. — Sur une sphère isolée, éloignée de tout autre conducteur, la *densité* électrique, ou charge électrique

par centimètre carré, est constante. On dit que la distribution est uniforme. Soit m la charge de la sphère, r son rayon, σ la densité,

$$m = 4\pi r^2 \sigma, \qquad \sigma = \frac{m}{4\pi r^2}.$$

Sur un conducteur non sphérique la distribution n'est pas uniforme. On appelle *densité en un point* le rapport $\frac{m}{s}$ de la charge d'une très petite surface s à son étendue.

Comparaison des densités en deux points. — On applique sur la surface du conducteur E un petit disque métallique e supporté par une mince tige isolante t (fig. 700). Ce disque, appelé **plan d'épreuve,** coïncide avec une surface égale à son étendue; il emporte, quand on l'éloigne normalement, une quantité d'électricité proportionnelle à la surface touchée et à la densité moyenne sur cette surface. On mesure cette quantité en portant le plan d'épreuve chargé dans le cylindre de Faraday. A cause de ses faibles dimensions, le plan d'épreuve diminue à peine la charge totale du conducteur. Les charges du plan d'épreuve sont *proportionnelles aux densités* en des points A et B successivement touchés, car elles sont proportionnelles aux charges qui couvrent, en A et en B, des éléments du conducteur égaux à sa surface.

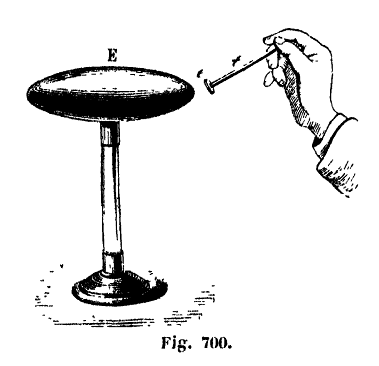


Fig. 700.

Distribution sur un conducteur quelconque. — La densité sur un conducteur éloigné de tout autre conducteur ne dépend pas de sa nature; elle ne dépend que de *sa forme*. La densité *double, triple* en chaque point *avec la charge totale, sans que la distribution varie.*

L'électricité se porte particulièrement sur les parties externes saillantes des conducteurs et la densité en un point croît avec la courbure en ce point. Sur un cylindre terminé par des calottes hémisphériques, la densité est sensiblement uniforme, d'une part sur la portion cylindrique, d'autre part sur les calottes; sur la partie cylindrique, elle est moindre que sur les hémisphères. Elle est très grande aux extrémités du grand axe d'un ellipsoïde très allongé. Si le grand axe s'allonge indéfiniment, la *densité tend à devenir infinie à son extrémité.*

La distribution électrique sur un conducteur ne dépend plus

seulement de sa forme, quand d'autres conducteurs se trouvent dans son voisinage. C'est ainsi que dans l'expérience de l'influence électrique (585), la distribution était uniforme sur la sphère S (fig. 687) avant que le cylindre AB en fût approché. Mais l'*induit réagit sur l'inducteur* et l'électricité positive de S, attirée par l'électricité négative de A, s'accumule en face du cylindre.

DÉPERDITION DE L'ÉLECTRICITÉ

599. Pression électrostatique. — Sur un conducteur électrisé *en équilibre*, l'électricité d'un élément superficiel *ab* est soumise à l'action d'une **force résultante** exercée par les charges du champ électrique. Cette force est *normale à l'élément*. Si, en effet, elle avait une direction oblique telle que I*f* (fig. 701), on pourrait la décomposer en deux composantes, l'une I*n*, normale, l'autre I*t* tangente à la surface. A cause de l'extrême mobilité des masses électriques sur un conducteur, la composante tangentielle déplacerait l'électricité de l'élément; or il n'y a pas de déplacement, puisque l'équilibre est établi. En outre, pour toute charge, positive ou négative de *ab*, la force résultante doit être dirigée *vers l'extérieur* du conducteur, puisque rien ne s'opposerait au mouvement électrique vers l'intérieur et que l'équilibre a lieu.

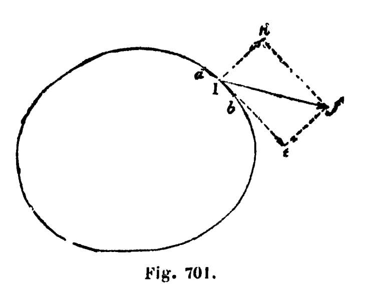


Fig. 701.

Le milieu isolant et, en particulier, la *pression du gaz extérieur* maintient l'électricité à la surface; en effet, si l'on introduit sous la cloche d'une machine pneumatique une sphère isolée, électrisée, et si l'on fait le vide, on constate, après avoir rendu l'air, que la sphère a perdu la plus grande partie de sa charge.

La force normale qui pousse l'électricité d'un conducteur vers l'extérieur s'appelle **pression électrostatique**. Elle croît *proportionnellement au carré de la densité électrique* (1).

Explication par la pression électrostatique des attractions et des répulsions des conducteurs électrisés. — Soient deux conducteurs ayant des charges de signes contraires (fig. 702) : les électricités contraires s'accumulent sur les faces en regard, et

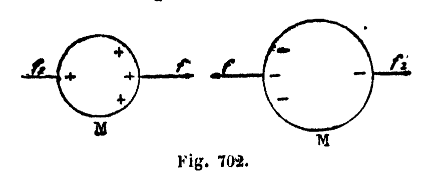


Fig. 702.

(1) La pression électrostatique en un point est l'action exercée sur la charge d'un cm^2 de la surface en ce point par le reste de la charge; or, si l'on *double* la charge totale, la charge sur le cm^2 considéré et le reste de la charge deviennent doubles simultanément; l'action, proportionnelle au produit des charges, est ainsi quadruplée.

les densités électriques y sont plus grandes que sur les faces opposées. Les pressions électrostatiques sont donc notablement plus grandes sur les faces en regard, elles entraînent les deux conducteurs l'un vers l'autre.

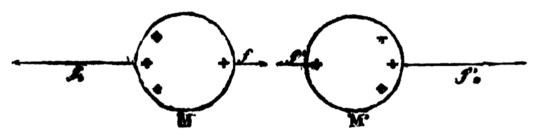
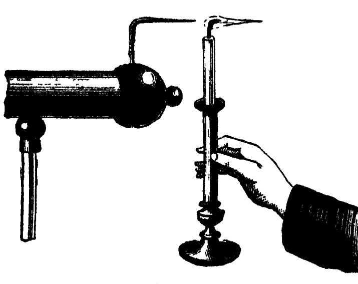


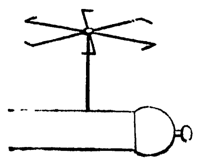
Fig. 703.

Sur deux conducteurs chargés d'électricité de même signe (fig. 703), les densités les plus fortes occupent les faces opposées et les pressions électrostatiques éloignent les deux conducteurs.

600. Rôle des pointes. — Sur une pointe, sur une arête d'un corps électrisé, la densité est très grande (**598**).

Corps électrisé terminé en pointe. — Un conducteur armé d'une pointe perd rapidement sa charge; un *vent électrique* semble s'échapper de la pointe, courbe la flamme d'une bougie (fig. 704) et peut même l'éteindre. L'air repousse la pointe comme il en est repoussé, et la pointe, si elle est mobile, se meut en sens inverse du vent électrique. C'est le cas du **tourniquet électrique**, petite chape mobile sur un axe vertical, portant six tiges de laiton. Les tiges forment les rayons d'un cercle, sont recourbées dans le même sens et pointues à l'extrémité. Placé sur une machine électrique en fonctionnement (fig. 705), cet appareil tourne *en sens inverse* de la direction de ses pointes.


Fig. 704.


Fig. 705.

Pointe présentée à un corps électrisé. — On décharge un corps en lui présentant une pointe qui communique avec le sol. La pointe subit une décomposition par influence électrique; la charge du corps est neutralisée par l'électricité contraire qui s'échappe

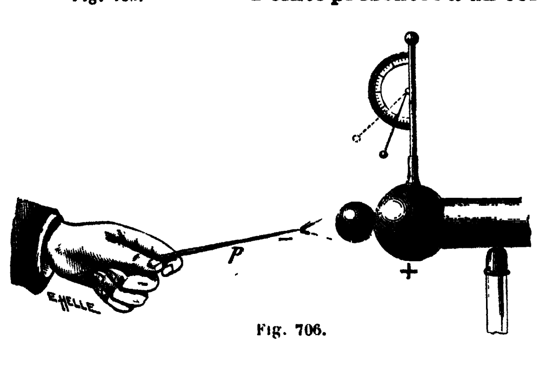


Fig. 706.

de la pointe (fig. 706) en produisant un vent électrique (fig. 707).

L'électricité qui s'écoule par une pointe offre dans l'obscurité une lueur violacée. Une pointe positive paraît terminée par une **aigrette** et une pointe négative par un **point brillant**.

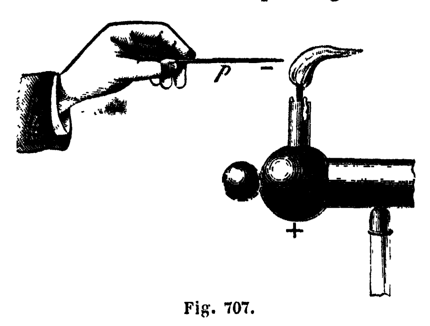


Fig. 707.

Étincelle. — Lorsque la distance de deux corps chargés d'électricités contraires sur leurs parties voisines est assez petite, il se produit une étincelle ou un *trait de feu* avec un bruit sec.

Les pressions électrostatiques ont surmonté la pression du gaz interposé et une communication passagère s'est établie par l'étincelle entre les deux conducteurs.

Quand une étincelle éclate entre deux conducteurs séparés par une substance isolante solide, l'isolant est rompu sur le trajet de l'étincelle ; la décharge est dite *disruptive.*

601. Conservation de l'électricité. — Un corps électrisé, *isolé, conserve* son électricité, tant que l'on ne la neutralise pas par une quantité égale d'électricité contraire. L'électricité d'un corps disparaît, plus ou moins vite, par un *isolement imparfait.*

602. Déperdition lente de l'électricité. — Un conducteur électrisé et isolé perd lentement son électricité, même lorsqu'il ne présente que des surfaces arrondies, et redevient neutre. La déperdition a lieu par le **gaz ambiant**, par le **support** et par la **lumière**.

Perte par les supports. — Certains supports isolants se laissent peu à peu pénétrer par l'électricité, surtout si la charge du conducteur est forte ; la perte est très réduite si le support est long et fin.

La cause la plus importante de déperdition par les supports est l'*humidité qui les recouvre,* elle établit une communication superficielle entre le conducteur et le sol. Des supports de *verre* isolent mal, parce qu'ils attirent l'humidité. L'*ébonite* constitue un meilleur isolant. Le *soufre* et la *paraffine* ne sont pas hygrométriques, et comme leur substance oppose une résistance extrêmement grande à la propagation de l'électricité, ils forment d'excellents supports.

Perte par la lumière. — Un corps électrisé perd sa charge s'il est éclairé par la lumière de l'arc voltaïque ou de l'étincelle électrique. La décharge est rapide pour les surfaces électrisées négativement. Un conducteur *fraîchement poli* de zinc, de cadmium et surtout d'alumi-

nium perd presque instantanément sa charge négative à la lumière solaire, et la déperdition est encore appréciable à la lumière diffuse du jour. Les rayons rouges sont inactifs.

POTENTIEL

603. Définition expérimentale du potentiel. — Un corps électrisé renferme une *quantité d'électricité* mesurable ; il est comparable à un corps chaud qui renferme une *quantité de chaleur*. Mais la quantité de chaleur ne suffit pas pour caractériser l'état calorifique d'un corps chaud, il faut aussi connaître sa *température*. Il en est de même pour un corps électrisé : sa quantité d'électricité ne suffit pas pour le caractériser, il faut aussi connaître son *potentiel*. La notion de *potentiel* s'introduit expérimentalement.

Un conducteur électrisé, de forme quelconque, est *mis en communication lointaine*, avec un électroscope, *par un fil métallique long et fin* (fig. 708), l'électroscope se charge et, sa **déviation reste constante**, *quel que soit le point a* du conducteur touché par le fil (extérieur ou intérieur si le conducteur est creux).

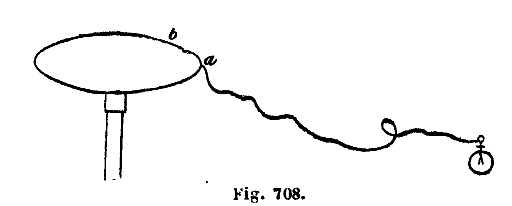


Fig. 708.

La densité peut être variable aux différents points du conducteur (**598**), mais la déviation constante de l'électroscope met en évidence *un état électrique*, commun à tous les points du conducteur, qu'on appelle **potentiel**. Le potentiel est *positif* si la charge de l'électroscope est positive, *négatif* si elle est négative.

604. Conducteurs au même potentiel. — Des conducteurs A et B ont le même potentiel s'ils donnent séparément des charges *égales et de même signe* à un électroscope à l'état neutre avec lequel ils sont mis successivement en communication lointaine. Les dimensions et les charges électriques de deux conducteurs au même potentiel peuvent être très différentes.

Communication de deux conducteurs au même potentiel. — Quand on relie par un fil fin *mn* (fig. 709) deux conducteurs A et B au même potentiel, les déviations de leurs électroscopes à communication

lointaine ne changent pas ; si l'on mesure aussi les densités en des

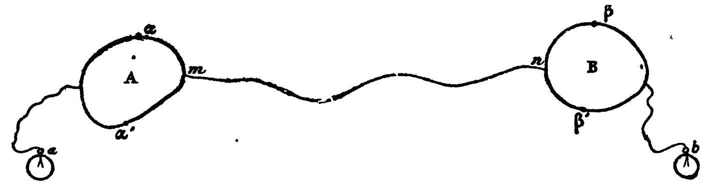


Fig. 709.

points α et α' sur le premier conducteur, β et β' sur le second, *avant et après la communication,* elles n'ont pas varié.

Si l'on mesure, avant et après la communication, les charges respectives des deux conducteurs A et B, avec un cylindre de Faraday (sans toucher les parois du cylindre), elles n'ont pas varié.

Potentiels différents. — Le potentiel d'un conducteur A est dit *supérieur* au potentiel d'un conducteur B si, en communication lointaine, la charge *a* de l'électroscope par A *est supérieure* à la charge *b* du même électroscope par B (en tenant compte du signe [1]).

Communication de deux conducteurs à potentiels différents. — Quand on réunit A et B par un fil *mn, de l'électricité positive* passe de A sur B, les densités diminuent sur A et augmentent sur B. Les deux conducteurs prennent un *potentiel commun,* intermédiaire entre les deux potentiels primitifs.

Si l'on mesure les charges des deux conducteurs avec un cylindre de Faraday, *avant* et *après leur communication,* elles ont séparément changé, mais leur somme est restée constante.

605. Comparaison des potentiels. — Un conducteur mis en communication avec le sol se décharge, ainsi que son électroscope indicateur : son potentiel devient nul. Le potentiel zéro est, par convention, le *potentiel du sol* et des conducteurs non électrisés.

Pour l'évaluation des potentiels on a choisi une unité de potentiel que l'on appelle **Volt**. Un corps est dit avoir un potentiel de V volts quand la *différence* entre le potentiel de ce corps et celui du sol est V volts. Cette unité, empruntée à l'électricité dynamique, est fort petite par rapport aux potentiels de l'électricité de frottement. Un potentiel de 100 volts ne donne qu'une déviation très faible à un électroscope sensible à feuilles d'or.

Graduation d'un électroscope en volts. — Des éléments de pile,

(1) 5 est supérieur à 2, et — 2 est supérieur à — 5.

associés en série (**674**) forment des conducteurs dont les pôles ont des potentiels constants et connus en volts. Pour graduer un électroscope en volts, on relie la boule de l'électroscope successivement aux pôles positifs de piles de 100, 200, 300 volts (le pôle négatif et la cage de l'électroscope communiquent avec le sol). La différence entre le potentiel du pôle positif de chaque pôle et le potentiel du sol est 100, 200, 300... volts. On note la déviation de l'électroscope qui correspond à chaque pile. On dresse une *table* de graduation où les valeurs des déviations sont inscrites en face des potentiels correspondants. Si l'on met en communication lointaine par sa boule avec un conducteur l'électroscope une fois gradué, il donne, en volts, le potentiel du conducteur.

Choix de l'indicateur de potentiel. — Les dimensions d'un électroscope, indicateur de potentiel, doivent être assez faibles pour que la charge qu'il prend à un conducteur n'en diminue pas d'une façon appréciable la charge.

606. Le passage d'électricité entre deux conducteurs dépend de leur différence de potentiel. — Un passage d'électricité, par un fil intermédiaire, n'a lieu qu'entre deux conducteurs de potentiels différents. La différence de potentiel, cause du passage d'électricité, est dite **force électromotrice.** Le système de deux conducteurs qui offrent entre eux une différence de potentiel possède une **énergie potentielle** (**615**), car leur retour à un potentiel commun développe du travail.

607. Conductibilité. — Réunissons par un fil *mn*, deux conducteurs A et B (fig. 709), *de potentiels différents.* Si le fil est *bon conducteur*, le système prend un potentiel commun en un temps inappréciable. Si le fil est *peu conducteur,* les électroscopes indicateurs varient lentement, et, après quelque temps, le système est au même potentiel. Avec un fil *isolant,* les potentiels ne s'égalisent pas.

608. Analogies calorifiques. Potentiel et température. — *La température, dans l'équilibre calorifique, joue le rôle du potentiel dans l'équilibre électrique.* Deux corps sont à la *même température* s'ils ne se cèdent aucune chaleur quand on les met en présence. S'ils ont des températures différentes, le plus chaud perd de la chaleur, le plus froid en gagne jusqu'à ce que les températures se soient égalisées. *La température caractérise l'état calorifique d'un corps;* ce n'est pas des quantités de chaleur respectives, mais de la différence des températures que dépendent les échanges de chaleur de deux corps.

Un appareil qui mesure les potentiels se comporte comme un thermomètre électrique. Son zéro correspond au potentiel du sol.

609. Analogies hydrauliques. — Potentiel et niveau. — Entre deux réservoirs contenant un même liquide pesant, à des niveaux différents, et réunis par un tube, il y a écoulement *du niveau le plus haut vers le niveau te plus bas,* quelles que soient les sections relatives des deux réservoirs. Ce n'est pas la quantité du liquide qui règle l'écoulement, ni la valeur absolue des niveaux respectifs, mais la *différence des niveaux;* l'écoulement cesse quand les niveaux se sont égalisés dans les deux réservoirs.

Une transmission électrique entre deux conducteurs est comparable à une transmission de liquide entre deux vases communiquants. *L'électroscope,* indicateur du potentiel, se comporte comme un **tube indicateur de niveau** en hydraulique. Le *potentiel zéro,* en électricité, joue le rôle du *niveau de la mer* en hydraulique.

610. Potentiel en un point d'un champ électrique. — Un conducteur isolé A, primitivement neutre, c'est-à-dire au potentiel du sol, s'électrise par influence quand on l'introduit dans un champ électrique : il prend un potentiel différent de celui du sol, car son électroscope indique une charge. Si le conducteur introduit est très petit, les masses électriques égales, de signes contraires et très voisines, développées sur lui par influence, ne modifient pas la distribution électrique du champ. Le potentiel du petit conducteur est le *potentiel du point* où il se trouve. L'ensemble des points de même potentiel forme une ***surface équipotentielle.***

Si le champ électrique est dû à un point électrisé ou à une sphère uniformément électrisée S, les surfaces équipotentielles sont, par raison de symétrie, des sphères qui ont pour centre le point électrisé ou le centre de la sphère (fig. 710). Le potentiel diminue, sans changer de signe, à mesure qu'on s'éloigne du centre.

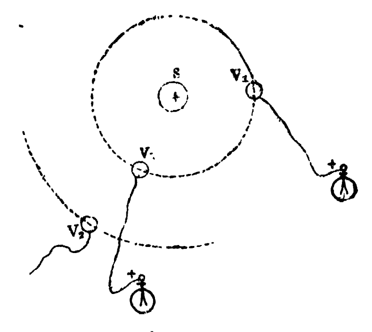


Fig. 710.

Il n'y a pas de transmission d'électricité si on relie deux petits conducteurs situés sur une même surface équipotentielle.

Un conducteur prend, dans un champ électrique, un potentiel V intermédiaire entre les potentiels V_1 et V_2 que prendraient ses extrémités si elles étaient séparées et isolées.

CAPACITÉ

611. La charge M d'un conducteur est proportionnelle à son potentiel V; elle est représentée par $M = CV$. La constante C, appelée

capacité électrique, est numériquement égale à la charge qui élève d'un volt le potentiel du conducteur.

I. **Conducteur isolé (éloigné de tout autre conducteur).** — La proportionnalité *de la charge* d'un conducteur isolé *à son potentiel* se démontre en prenant pour conducteur un cylindre de Faraday. Des charges 1, 2, 3, 4... ayant été communiquées au cylindre, ces charges se répandent librement sur sa surface extérieure.

Le cylindre étant mis *en communication lointaine* avec un électroscope indicateur de faibles dimensions, les charges successives de l'électroscope *sont proportionnelles à la charge totale* du cylindre et elles représentent aussi ses potentiels successifs. Ces potentiels sont ainsi 1, 2, 3, 4..., comme les charges.

La capacité d'un conducteur *soustrait à toute influence électrique* est *un nombre fixe* qui le caractérise. Elle dépend de la forme et des dimensions du conducteur, elle est indépendante de sa substance.

II. **Conducteur soumis à des influences électriques.** — *Dans des conditions d'influence déterminées*, la capacité d'un conducteur, ou la quantité d'électricité qu'il faut lui communiquer pour lui donner un potentiel d'un volt, ne caractérise plus le conducteur, elle *varie avec les conditions d'influence*. Si ces conditions ne changent pas, la charge d'un conducteur est proportionnelle à son potentiel.

Pour prouver cette proportionnalité, considérons un conducteur S en présence d'autres conducteurs; en multipliant par *n* toutes les charges on obtient un nouvel équilibre, *avec la même distribution;* les indications des électroscopes à communication lointaine croissant proportionnellement aux charges, les potentiels respectifs des conducteurs sont proportionnels à leurs charges. Le potentiel du conducteur S étant égal à V, sa charge sera $M' = C'V$. La capacité C' dépend de l'influence exercée sur S.

L'**unité de capacité** est la capacité d'un conducteur qui acquiert un potentiel d'un volt, par une charge d'un coulomb. Cette unité a reçu le nom de **farad**. Elle est extrêmement grande, aussi on emploie habituellement le **microfarad** qui est sa millionième partie.

Capacités calorifique et électrique. — Lorsque deux corps, de même température, fondent des masses de glace inégales pour passer à 0°, leurs capacités calorifiques sont proportionnelles à ces masses et différentes. De même, deux conducteurs, à un même potentiel, perdent des charges électriques inégales pour passer au potentiel zéro si leurs capacités électriques, proportionnelles à ces charges, sont différentes.

A la relation $Q = C\theta$, où θ désigne la température et C la capacité calorifique d'un corps, correspond en électricité une équation $M = CV$.

612. Conducteurs en communication lointaine. Potentiel résultant. — Deux conducteurs électrisés étant assez distants l'un de l'autre pour ne pas s'influencer, soient M et M' leurs charges, C et C' leurs capacités, V et V' leurs potentiels : on a $M = CV$ et $M' = C'V'$.

Si on les réunit par un fil long et fin, de capacité négligeable, les deux conducteurs en forment un seul de capacité $C + C'$; sa charge est $M + M'$; son potentiel V_1 est intermédiaire entre V et V'.

L'équation qui donne V_1 exprime la *constance de la charge,* elle correspond à l'équation des échanges de chaleur entre deux corps de températures différentes;

$$CV + C'V' = V_1 (C + C') \quad \text{d'où} \quad V_1 = \frac{CV + C'V'}{C + C'}.$$

Si l'un des deux conducteurs est primitivement neutre, $V' = 0$;

$$CV = V_1 (C + C') \quad \text{d'où} \quad V_1 = \frac{CV}{C + C'}.$$

Mesure des capacités électriques. — Si le conducteur neutre de l'équation $CV = V_1 (C + C')$ a une capacité C' connue, on écrit :

$$C (V - V_1) = C'V_1 \qquad \text{et } C = C' \frac{V_1}{V - V_1} = \frac{C'}{\frac{V}{V_1} - 1},$$

ce qui donne la capacité C par le rapport $\frac{V}{V_1}$ des potentiels du conducteur électrisé, mesurés avant et après sa communication lointaine avec un conducteur neutre.

Application à la mesure des potentiels. — Si la capacité C' de l'équation $CV = V_1 (C + C')$ est celle d'un indicateur de potentiel de capacité très petite par rapport à C, on a sensiblement $V_1 = V$ et sa charge est $C'V$.

D'après cela, le rapport des potentiels v et v' de deux conducteurs électrisés est égal au rapport des charges $C'v$ et $C'v'$ d'un indicateur de potentiel de petite capacité C', mis successivement en communication lointaine avec les deux conducteurs.

613. Variations du potentiel et de la capacité dans l'influence électrique. — **1° Sur l'inducteur.** — Soit un conducteur S ayant une charge positive M et une capacité C; son potentiel V est donné par $M = CV$.

On approche de S un conducteur AB à l'état neutre, c'est-à-dire au potentiel du sol (fig. 687); le conducteur AB se charge par influence et, la réaction de son électricité induite change la distribution sur l'inducteur S. L'électricité positive de S s'accu-

mule en face du conducteur induit; les parties plus éloignées sur S perdant de l'électricité, *la charge de son électroscope indicateur diminue* et indique un *potentiel* V_1 *inférieur* à V. La quantité M n'ayant pas varié sur S, la diminution du potentiel y est accompagnée d'un *accroissement de la capacité*. La relation nouvelle $M = C'V_1$ comparée à $M = CV$, donne $C' > C$ puisqu'on a $V_1 < V$.

Lorsque l'induit AB est relié au sol (fig. 688), l'électricité de S s'accumule en plus grande quantité en face de l'induit et la charge de son électroscope indicateur diminue davantage; le potentiel de S diminue donc encore et sa capacité augmente.

2° **Sur l'induit.** — Si l'induit AB, en face d'un inducteur S positif, est également en communication lointaine avec un électroscope, cet électroscope se charge positivement (1). L'induit a donc un potentiel positif qui diminue à mesure qu'il s'éloigne de S (2).

Entre deux conducteurs qui sont au même potentiel V ou encore qui sont au potentiel du sol, il n'y a pas d'influence.

614. Unités électrostatiques. — En électricité statique, on prend souvent des unités spéciales de quantité, de potentiel et de capacité.

Unité de quantité. — D'après l'équation $f = \frac{mm'}{d^2}$ où f est exprimé en dynes et d en centimètres, on prend pour unité de quantité, la charge que doivent avoir deux petits corps, également chargés, pour que leur action mutuelle soit égale à une dyne quand ils sont placés dans l'air, à une distance de un centimètre.

Unité de potentiel. — L'unité de potentiel est le potentiel d'une sphère d'un centimètre de rayon qui a l'unité de charge.

Unité de capacité. — D'après la relation $m = cv$, une sphère isolée d'un rayon d'un centimètre a l'unité de capacité; en effet, d'après la définition de l'unité de potentiel, on a pour cette sphère $m = 1$ si $v = 1$.

Potentiel d'une sphère. — Mettons en communication *lointaine* une sphère de rayon r et une sphère de rayon 1, si on leur donne une charge totale M, cette charge se distribue *proportionnellement aux rayons.* En effet, les densités mesurées avec un plan d'épreuve sont trouvées proportionnelles aux rayons et comme les distributions sont uniformes, il en est de même des charges m et m_1. On a $M = m + m_1$ et $\frac{m}{r} = \frac{m_1}{1}$. Mais la sphère de rayon 1 a un potentiel égal à sa charge m_1 et ce potentiel v, qui est le potentiel commun, est aussi le potentiel de la sphère de rayon r; on a donc $m = rv$. Donc, *la capacité d'une sphère est égale à son rayon.*

(1) Même si l'électroscope est mis en communication avec le conducteur AB par un point qui est voisin de S et chargé d'électricité négative.

(2) Avec un inducteur S négatif, l'induit AB aurait un potentiel négatif.

ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

615. Énergie d'un conducteur électrisé. — La décharge d'un conducteur donne lieu à diverses manifestations d'énergie : calorifiques, mécaniques, etc., un conducteur électrisé possède donc une capacité de travail, ou une **énergie potentielle.** Cette énergie est égale au travail dépensé pour électriser le conducteur.

Un travail électrique est comparable au travail de la pesanteur. Le potentiel électrique joue le même rôle que le potentiel en pesanteur. De même qu'un corps pesant produit du travail en tombant d'un niveau supérieur à un niveau inférieur, de *l'électricité positive effectue un travail en passant d'une région de potentiel plus élevé à une région de potentiel moindre.*

616. Énergie potentielle d'une charge électrique au potentiel V. — En s'écoulant par une ouverture pratiquée à la partie inférieure d'un réservoir dont le niveau est *maintenu* à une hauteur H, un poids P de liquide produit le même travail PH, que s'il tombait de la hauteur H. Quand il ne s'écoule pas, un poids P de liquide possède une énergie potentielle PH (1).

De même, une quantité d'électricité M sortant d'un conducteur qui répare ses pertes et qui est *maintenu* à un potentiel constant V, produit un travail MV en passant au potentiel zéro; *l'énergie potentielle d'une charge* M *au potentiel* V est, dans ces conditions, égale à MV; elle est donc proportionnelle au potentiel V.

Signification du potentiel d'un conducteur. — Dans l'expression PH du travail, gH représente le travail que l'unité de masse d'un corps pesant effectue en tombant jusqu'au sol; de même le potentiel V d'un conducteur est le *travail que peut produire l'unité d'électricité positive en passant du potentiel* V *au potentiel zéro.* C'est donc l'énergie potentielle de l'unité d'électricité ou encore le *travail dépensé pour amener l'unité d'électricité* du potentiel zéro au potentiel V sur le conducteur.

Travail d'une charge électrique M passant du potentiel V_1 au potentiel V_2. — Si un poids P de liquide s'écoule d'un réservoir de niveau H_1, jusqu'à un niveau H_2, son travail est $P(H_1 - H_2)$; de même une charge électrique M effectue un travail $M(V_1 - V_2)$ en passant du potentiel V_1 au potentiel V_2.

Le travail d'un poids ne *dépend pas du chemin parcouru*, mais seulement de la hauteur de chute; de même, le travail d'une charge

(1) gH est l'énergie potentielle, à la hauteur H, de l'unité de masse pesante.

électrique ne dépend pas du mode de décharge, mais seulement des potentiels extrêmes.

617. Énergie d'un conducteur à charge limitée. — Un conducteur qui a une charge *limitée* M et un potentiel V, ne produira en passant au potentiel zéro qu'un travail inférieur à MV, car, dans la chute, le potentiel diminue en même temps que la charge à laquelle il est proportionnel. Ce travail sera $\frac{MV}{2}$(1). De même un réservoir cylindrique, contenant un liquide de hauteur H et de poids mg, produit en se vidant un travail $\frac{mgH}{2}$ comme si le poids mg tombait du niveau moyen au niveau zéro.

Inversement, pour porter sur un conducteur une charge M au potentiel V, il faut dépenser $\frac{MV}{2}$, ou $\frac{CV^2}{2}$, ou $\frac{M^2}{2C}$ d'après $M = CV$.

618. Énergie d'un système de conducteurs électrisés. — Le travail total de la décharge de plusieurs conducteurs est la somme des travaux dus aux décharges isolées des conducteurs. Pour des conducteurs de charge M, M'... et de potentiels V, V',... l'énergie totale sera $\frac{1}{2}(MV + M'V' + \ldots)$.

---

(1) **Pour démontrer cette proposition, subdivisons la masse M en une infinité de masses très petites m, m', m''..., transportées successivement du conducteur au sol.**

La charge primitive cv du conducteur, devient cv_1, après l'écoulement de m; m étant la charge qui portait le potentiel de v à v_1, $m = c(v - v_1)$. Si m est très petit, v et v_1 diffèrent très peu, et on peut attribuer au conducteur pendant le transport de m un potentiel moyen $\frac{v + v_1}{2}$. Le travail effectué est $m\frac{v + v_1}{2} = c\frac{v^2 - v_1^2}{2}$.

La charge suivante $m' = c(v_1 - v_2)$ produit un travail $m'\frac{v_1 + v_2}{2} = c\frac{v_1^2 - v_2^2}{2}$....

La somme $c\frac{v^2 - v_1^2}{2} + c\frac{v_1^2 - v_2^2}{2} \ldots\ldots + c\frac{v^2_{n-1} - v^2_n}{2}$, **est la somme des travaux** dus aux transports successifs. Le potentiel v_n du conducteur après le transport de la n^e masse, c'est-à-dire après la décharge complète, est nul. La somme se réduit à $\frac{cv^2}{2}$.

Fig. 711.

Une représentation graphique conduit au même résultat; en portant les masses en abscisses et les potentiels en ordonnées, une charge M au potentiel V est figurée par un point B du plan.

Si M appartient à un conducteur qui conserve son potentiel, les fractions m, en passant au sol, produisent un même travail mV; le travail total est le rectangle O*b*BA.

Mais si le potentiel diminue de $\frac{V}{n}$ à chaque perte m, les travaux successifs sont de petits rectangles mV, $m\left(V - \frac{V}{n}\right)$, $m\left(V - \frac{2V}{n}\right)$, $m\left(V - \frac{(n-1)V}{n}\right)$. Leur somme a pour limite le triangle O*b*B, ou $\frac{MV}{2}$.

En déchargeant chaque conducteur successivement, la distribution et les potentiels subiraient des modifications. Mais, le travail produit étant, pour chaque conducteur, indépendant de son mode de décharge, nous pouvons supposer qu'on enlève simultanément à tous les conducteurs des quantités telles que la *distribution ne varie pas* après chaque décharge partielle; de cette façon, chacun des conducteurs passe graduellement de son potentiel V au potentiel zéro, en gardant une *capacité constante*, et produit un travail $\frac{CV^2}{2} = \frac{M^2}{2C} = \frac{MV}{2}$.

Cette expression générale comporte des simplifications.

1° Un conducteur qui n'est électrisé que *par influence* renferme des quantités égales des deux électricités, sa charge totale M est nulle; le terme qui lui correspond dans l'énergie est donc *nul*.

2° Le terme relatif à un conducteur *communiquant avec le sol* est également nul, car si la charge n'est pas nulle, le potentiel est *nul*.

619. Expression du potentiel. — Le *potentiel électrique* V, en un point d'un champ électrique qui contient une ou plusieurs masses, *est le travail qu'il faut dépenser contre les forces électriques* du champ pour amener de l'infini en ce point l'unité de masse électrique positive.

I. — *Une seule masse électrisée* $+m$ en O. Le travail dépensé pour amener une masse $+1$ de la distance $OP' = r'$ à la distance $OP = r$ de m (fig. 712) est, si $r' - r$ est très petit,

Fig. 712.

$$\frac{m}{r^2}(r'-r) \quad \text{ou} \quad \frac{m}{r'^2}(r'-r) \quad \text{ou} \quad \frac{m}{rr'}(r'-r) = \frac{m}{r} - \frac{m}{r'}$$

Afin d'évaluer le travail dépensé pour transporter la masse $+1$ de la distance r_n ou P_nO à la distance r ou PO, on décompose la distance P_nP en segments très petits ou éléments P_nP_{n-1}, $P_{n-1}P_{n-2}$ ..... P_3P_2, P_2P_1, P_1P; on exprime le travail pour chacun des éléments et on calcule la somme. Si la masse $+1$ passe successivement des distances r_n à r_{n-1}, r_{n-1} à r_{n-2} ...... r_4 à r_3, r_3 à r_2, r_2 à r_1, r_1 à r; le travail dépensé est :

$$-\frac{m}{r_n}+\frac{m}{r_{n-1}}-\frac{m}{r_{n-1}}+\frac{m}{r_{n-2}}-\ldots-\frac{m}{r_3}+\frac{m}{r_2}-\frac{m}{r_2}+\frac{m}{r_1}-\frac{m}{r_1}+\frac{m}{r}=\frac{m}{r}-\frac{m}{r_n},$$

la somme se réduit à $\frac{m}{r}$, car $\frac{m}{r_n}$ est nul lorsque r_n est infini.

II. — ***Plusieurs masses.*** Le travail V de la résultante est, en chaque point du champ, égal à la somme des travaux des composantes ou à la somme des $\frac{m}{r}$ relatifs aux différentes masses, on a $V = \Sigma \frac{m}{r}$.

Le potentiel V en un point P d'un champ électrique est exprimé par la somme algébrique des quotients obtenus en divisant chacune des masses du champ par sa distance au point P.

Potentiel en un point du champ d'une sphère uniformément électrisée. — L'action de la sphère sur un point extérieur P est la même que si toute sa masse électrique M était concentrée en son centre O; on se trouve

donc dans le cas d'une seule masse agissante M ; le potentiel en P est $\frac{M}{r}$; r est la distance du point P au centre O de la sphère.

Surfaces équipotentielles. — En certains points d'un champ électrique, le potentiel $V = \Sigma \frac{m}{r}$ peut prendre une même valeur; les points qui ont un même potentiel V_A occupent une *surface* dite équipotentielle, les points de même potentiel V_B occupent une autre surface équipotentielle. Tout le champ est sillonné par des surfaces équipotentielles distinctes, aussi rapprochées qu'on le veut, pour des potentiels graduellement croissants ou décroissants. Si une masse + 1 passe d'un point A_1 de la surface équipotentielle V_A à un point B_1 de la surface équipotentielle V_B, avec $V_A > V_B$, les forces électriques effectuent, dans ce passage, un travail $V_A - V_B$. Pour pousser la masse + 1 de B_1 en A_1, le travail des forces électriques $V_B - V_A$ est négatif; en effet, il faut alors dépenser, contre les forces électriques, un travail $V_A - V_B$.

En un point d'une surface de potentiel constant V_A, la résultante des forces électriques est ***normale à la surface***, puisque cette résultante n'effectuerait aucun travail dans un déplacement quelconque d'une masse électrique sur la surface. Une surface sur laquelle la force électrique résultante est, en tout point, normale à la surface, est équipotentielle, ainsi, la *surface d'un conducteur* en équilibre électrique est *une surface équipotentielle,* car en chacun de ses points la résultante ne produit aucun déplacement électrique et elle est, d'après cela, normale à la surface (**599**).

Dans un déplacement d'une masse électrisée d'un point A de la surface d'un conducteur à un point A_1 intérieur, le travail des forces électriques est nul, car la force électrique est nulle à l'intérieur, et on a $V_{A_1} - V_A = 0$. ***Le potentiel à l'intérieur d'un conducteur est*** donc ***le même qu'à la surface et constant en tout point.***

Si, *par un fil long et fin*, on relie un conducteur électrisé à une sphère, l'équilibre s'établit entre les deux conducteurs et leur ensemble prend un même potentiel. Ce potentiel reste celui du conducteur si la sphère est suffisamment petite.

La sphère a pour potentiel le potentiel de son centre O ; m_1 étant la charge de la sphère et ρ son rayon, ce potentiel se réduit à $\frac{m_1}{\rho}$. Les termes de la somme $\Sigma \frac{m}{r}$ relative au point O sont, en effet, négligeables : d'abord, pour les masses du fil qui sont très petites; en second lieu, pour les masses du conducteur dont les distances au point O sont très grandes. Si le rayon de la sphère est égal à 1, le potentiel en O est la charge m_1 de la sphère et c'est aussi le potentiel du conducteur.

Énergie potentielle d'un champ électrique. — Supposons qu'une masse m_1 en A forme, seule, le champ électrique, le travail dépensé pour amener une masse + m_2 en B à une distance r_{21} sera $\frac{m_2 m_1}{r_{21}} = m_2 V_2$ en appelant V_2 le pot. en B (le pot. en B est le travail $\frac{m_1}{r_1}$ nécessaire pour amener

$+1$ de l'infini en B, en présence de m_1 qui est en A). On a $m_1V_1 = m_2V_2$, car il faudrait dépenser le même travail pour amener m_1 en A en présence de m_2 qui serait en B. Le travail dépensé contre les forces électriques pourra donc s'écrire $\frac{1}{2}(m_1V_1 + m_2V_2)$.

La masse m_1 étant en A et la masse m_2 en B, amenons une 3e masse m_3 en C, le travail dépensé sera $m_3\left(\frac{m_1}{r_{13}} + \frac{m_2}{r_{23}}\right) = m_3V_3$, V_3 étant le potentiel en C, dû à m_1 et m_2. Le travail total pour former le champ des 3 masses est ainsi : $\frac{m_1m_2}{r_{12}} + \frac{m_1m_3}{r_{13}} + \frac{m_2m_3}{r_{23}}$. On peut encore l'écrire :

$$\text{ou } \frac{1}{2}\left(\frac{m_1m_2}{r_{12}} + \frac{m_1m_3}{r_{13}}\right) + \frac{1}{2}\left(\frac{m_2m_1}{r_{12}} + \frac{m_2m_3}{r_{23}}\right) + \frac{1}{2}\left(\frac{m_3m_1}{r_{13}} + \frac{m_3m_2}{r_{23}}\right)$$

$$\text{ou } \frac{1}{2}(m_1V_1 + m_2V_2 + m_3V_3).$$

V_1 potentiel en A dû à m_2 et m_3, V_2 potentiel en B dû à m_1 et m_3, V_3 potentiel en C dû à m_1 et m_2.

En général, pour un nombre quelconque de masses, le travail sera $\frac{1}{2}\Sigma mV$. C'est aussi l'énergie potentielle du champ électrique. Au point où se trouve m, V est le potentiel dû aux autres masses.

Énergie potentielle d'un conducteur. — Pour un conducteur de masse M et de potentiel V, l'expression $\frac{1}{2}\Sigma mV$ devient $\frac{1}{2}V\Sigma m$ ou $\frac{1}{2}VM$, puisque le potentiel est le même en tous les points.

Énergie potentielle d'un système de conducteurs. — S'il y a plusieurs conducteurs dans le champ, $\frac{1}{2}\Sigma mV = \frac{1}{2}M_1V_1 + \frac{1}{2}M_2V_2 + \ldots$

620. Unités pratiques. — Pour la quantité d'électricité, l'unité pratique est le **coulomb**; pour la différence de potentiel, c'est le **volt**; pour la capacité, le **farad**. Le *volt* est la chute de potentiel pour laquelle un *coulomb* produit un travail d'un *joule*.

Si la quantité est exprimée en coulombs, le potentiel en volts, l'énergie potentielle $\frac{MV}{2}$ ou $\frac{CV^2}{2}$ représente des joules.

Si la quantité d'électricité est donnée en coulombs et le potentiel en volts, la capacité est exprimée en farads, d'après l'équation $M = CV$. Le farad est donc la capacité d'un conducteur qui prend un potentiel d'un volt pour une charge d'un coulomb. Le farad est la capacité d'une sphère qui a 9 millions de kilomètres de rayon; le microfarad en est la millionième partie.

MACHINES ÉLECTRIQUES

621. Une machine électrique est un appareil producteur d'*énergie potentielle électrique.* Elle charge deux collecteurs ou pôles et établit entre eux une *différence de potentiel;* le potentiel de l'un d'eux s'abaisse, et le potentiel de l'autre s'élève. Les deux électricités sont développées à la fois *en quantités égales.* Si l'un des pôles communique avec le sol, l'autre se charge seul. Les électricités des deux pôles, de potentiels différents, se neutralisent quand elles se réunissent, elles donnent alors lieu à un écoulement rapide d'électricité (*décharge*). Si les électricités se renouvellent par le fonctionnement de la machine, l'écoulement d'électricité, à travers le milieu qui sépare les pôles, devient continu (*courant*).

Tant que les électricités développées par la machine électrique sur les deux collecteurs s'y maintiennent, les deux collecteurs sont dits chargés d'*électricité statique.* Quand ces électricités se réunissent, leur courant donne lieu à des effets d'*électricité dynamique.*

Le fonctionnement de toute machine électrique exige une dépense de travail. Dans les machines électrostatiques le travail dépensé est mécanique. Les électricités des deux collecteurs restituent, en se réunissant, le travail qui a été dépensé pour les séparer. Les collecteurs perdent en même temps l'énergie potentielle que la charge leur avait communiquée.

MACHINES A FROTTEMENT

Les premières machines furent des machines à frottement.

622. La machine de Ramsden comprend : 1° un appareil producteur et transporteur d'électricité, 2° un collecteur.

Description (fig. 713). I. L'*appareil producteur* et *transporteur* est un plateau ou disque de verre vertical D, mobile dans son plan autour de son axe et passant à frottement entre deux paires de coussins C, en cuir rembourré de crin, diamétralement opposés et fixes. Les coussins communiquent avec le sol S par les montants de bois auxquels ils sont assujettis. Le disque se charge positivement au contact du cuir, qui se charge négativement. L'électricité positive est portée par le disque en face du collecteur.

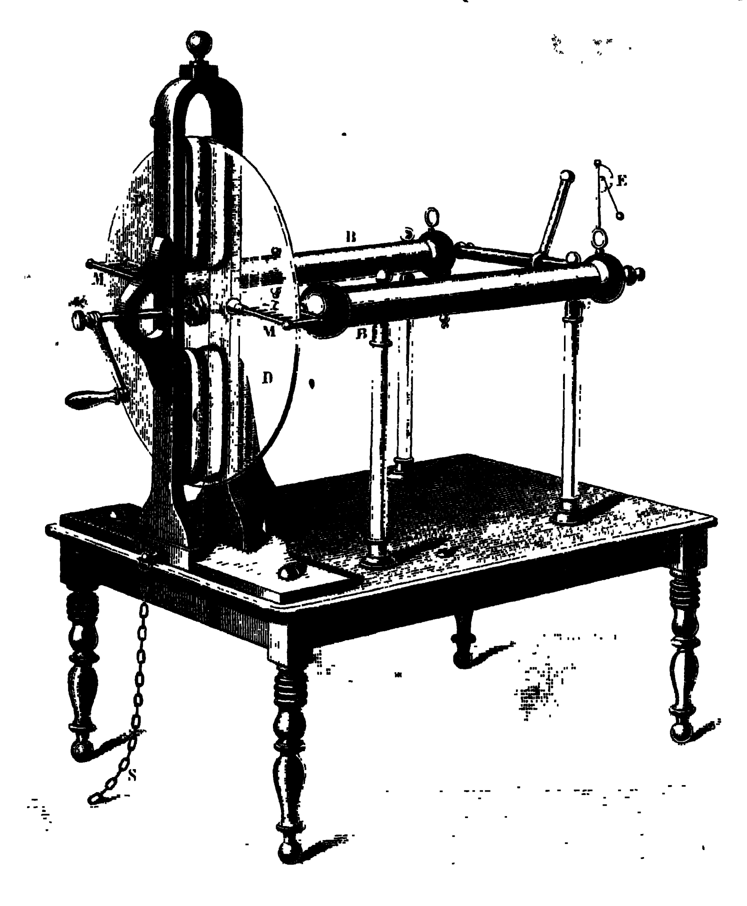


Fig. 713.

II. Le *collecteur*, qui joue un rôle analogue à celui d'un cylindre de Faraday, est un conducteur en forme de *mâchoires*. Les mâchoires M, disposées à 90° des coussins et armées de pointes, forment des *peignes* qui contournent les bords du disque et sont perpendiculaires à son plan ; le disque tourne entre les peignes sans les toucher. Chacune des mâchoires est reliée à un gros cylindre creux de laiton B. Les deux cylindres B, parallèles entre eux, sont isolés par des colonnes de verre fixées sur une table en bois qui porte les montants des coussins. Leurs extrémités éloignées du disque sont reliées par un tube transversal.

Fonctionnement. — Chargé sur ses deux faces d'électricité positive par le contact des coussins supérieurs, le disque transporte cette électri-

cité en face de la mâchoire M et *agit sur elle par influence*. L'électricité négative attirée s'échappe par les pointes (**600**), neutralise l'électricité positive des deux faces du verre et ramène ainsi à l'état neutre le quadrant O du disque qui a franchi la mâchoire (fig. 714). Le collecteur cylindrique B, qui fait corps avec la mâchoire M et qui est terminé par des surfaces arrondies, se charge positivement. Après un quart de tour, le quadrant déchargé frotte contre les coussins inférieurs, s'y charge positivement et, en agissant ensuite sur la deuxième mâchoire M′, détermine encore une électrisation positive du collecteur. Par une rotation continue, la charge positive croît de plus en plus sur le collecteur par *addition*, comme sur un cylindre de Faraday (1).

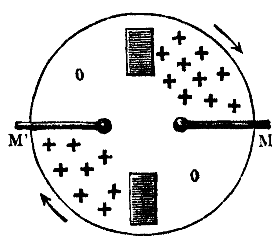


Fig. 714.

Potentiel du collecteur. — A mesure que la charge M des cylindres augmente, la différence V entre leur potentiel et le potentiel du sol croît proportionnellement, d'après la relation $M = CV$, où C représente la capacité du collecteur. Le potentiel est mesuré par un pendule E fig. 713) (*électromètre à cadran*) dont le support conducteur repousse une tige électrisée comme lui et terminée par une balle de sureau. La déviation de la tige est lue sur un cadran.

Débit. — Le débit, ou *la quantité d'électricité que fournit la machine, par seconde,* est mesuré par le *nombre des étincelles* qu'un conducteur relié au sol tire du collecteur à une distance déterminée. Le débit, indépendant de la capacité des collecteurs, ne dépend ni de la durée ni de la grandeur de la pression des coussins sur le disque, pourvu que le contact soit bien assuré (2). Il est *proportionnel à la longueur des coussins* et ne dépend pas de leur largeur (la longueur augmente le nombre des points de contact, la largeur augmente la durée du contact). Le débit varie avec la surface frottante ; on recouvre habituellement les coussins d'*or mussif* (bisulfure d'étain). La même quantité d'électricité étant produite à chaque tour, *le débit est proportionnel à la vitesse de rotation* du disque.

Limite de la charge. — La charge cesse d'augmenter quand le potentiel du collecteur a grandi assez pour qu'une décharge éclate entre les peignes et les coussins. Cette limite s'atteint rarement ;

---

(1) L'électricité négative des coussins, au lieu de *s'écouler dans le sol* par les montants de bois, quand l'électricité positive du disque s'est éloignée et a cessé de l'attirer, pourrait servir à charger négativement un second collecteur.

(2) Le frottement ne développe pas d'électricité comme il produit de la chaleur : le développement d'électricité paraît dû au *simple contact de deux substances différentes* ; le frottement établit un bon contact entre un grand nombre de particules.

pratiquement, le potentiel ne croît plus quand la déperdition par *l'humidité superficielle des supports* contrebalance le débit[1].

Source de l'énergie électrique. — La source de l'énergie électrique est le travail mécanique dépensé pour éloigner les masses positives du disque, des masses négatives des coussins. *Le travail de frottement est perdu*, il échauffe le plateau *et n'est pas converti en énergie électrique.*

MACHINES A INFLUENCE

Une machine dite *à influence* s'amorce par une petite charge fournie au départ. cette charge n'a pas besoin d'être constamment renouvelée comme dans les machines à frottement, elle sert à produire *par influence* de grandes quantités d'électricité.

623. Machine de Wimshurst. — **Description.** — Elle se compose de deux plateaux ou disques de verre ou d'ébonite, R et S,

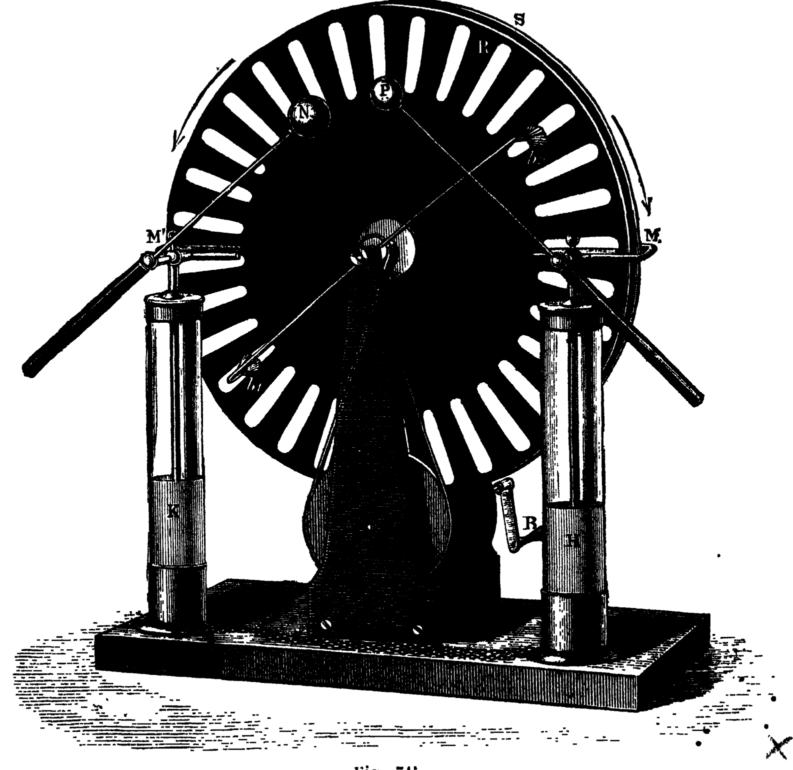


Fig. 715.

(1) Étant vernis à la gomme laque, les supports de verre sont peu hygrométriques.

de même rayon, qu'une manivelle B fait tourner par des courroies *en sens inverse* l'une de l'autre autour d'un axe passant par leur centre; ils servent de *transporteurs*. Sur les faces extérieures des deux disques sont collés des *secteurs d'étain*, offrant un léger relief; sur ces secteurs appuient des balais en *fil de laiton b* portés par deux conducteurs diamétraux, croisés l'un sur l'autre et inclinés d'environ 60° sur le diamètre horizontal des plateaux (fig. 715).

Les *collecteurs*, formés de deux mâchoires métalliques M et M', embrassent les deux disques aux extrémités de leur diamètre horizontal. Ils communiquent avec deux tiges métalliques terminées par deux boules de décharge P et N qu'on peut écarter ou rapprocher à volonté l'une de l'autre.

Pour amorcer la machine, on fait tourner les disques jusqu'à ce qu'on entende un bruissement caractéristique.

Le **signe des pôles** se reconnaît aux lueurs violacées qui sortent dans l'obscurité des pointes des peignes. Au peigne M qui communique avec le pôle positif et d'où s'écoule du fluide négatif on

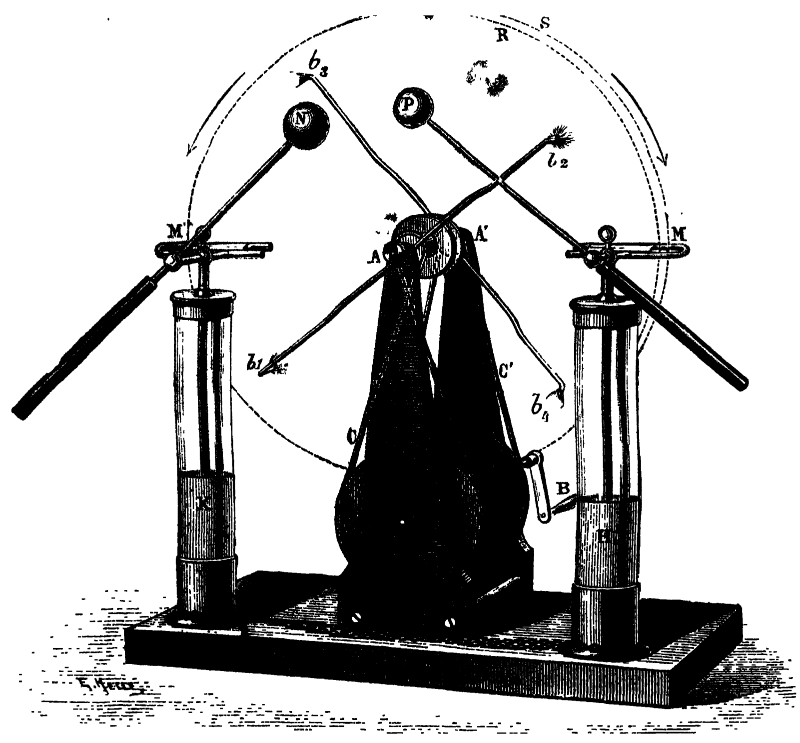


Fig. 716.

voit des *points brillants;* du fluide positif s'écoule en *aigrettes* du peigne M' qui communique avec le pôle négatif.

Sur la figure 716, les plateaux sont transparents. On voit les cordons C et C' enroulés *en sens inverse* sur les poulies, et les balais b_3 et b_4 qui frottent sur le plateau postérieur S.

Différence de potentiel aux pôles. — Une décharge a lieu lorsque la *différence de potentiel* entre les boules P et N *peut vaincre la résistance de l'air.* Cette différence de potentiel est très grande; pour une distance des boules de 1 cm., elle dépasse 20 mille volts.

La longueur de l'étincelle ne peut être supérieure à la distance des deux mâchoires métalliques; la différence de *potentiel maximum* correspond à cette distance.

Débit. — Le débit se mesure par le *nombre des étincelles* qui jaillissent, en un temps donné, entre les boules de décharge placées à une certaine distance. Le débit *est proportionnel à la vitesse de rotation* et, vu l'absence presque complète de frottement, cette vitesse peut être beaucoup plus grande que dans une machine de Ramsden. Le débit, exprimé en coulombs, reste extrêmement faible.

Quantité d'électricité des décharges. — Avec de petits collecteurs, les étincelles sont nombreuses et grêles. En effet, d'après la relation $M = CV$, pour une valeur de V correspondant à la décharge pour une distance déterminée des boules P et N, M est petit et se reproduit très vite si la capacité C est faible.

Source de l'énergie électrique. — Il faut un effort plus grand pour faire tourner les disques quand la machine fonctionne que quand elle ne fonctionne pas; l'énergie électrique développée a sa source dans le travail mécanique qu'il faut dépenser pour *vaincre l'attraction mutuelle des organes chargés d'électricités contraires.* L'énergie électrique développée par seconde, ou la puissance, se mesure en *watts.*

Théorie du fonctionnement. — Pour la commodité de la représentation, les disques sont remplacés par deux cylindres ayant même axe, tournant en sens inverse, l'un en dedans de l'autre, ils sont figurés sur une coupe perpendiculaire à l'axe (fig. 717). Les balais b_1 b_2 appuient sur les secteurs d'étain du cylindre intérieur, les balais b_3 b_4 sur les secteurs du cylindre extérieur.

Imaginons qu'un des secteurs *m* du cylindre intérieur soit chargé négativement; en tournant vers la gauche, cette charge passe devant le balai b_3, agit sur lui par influence et en tire de l'électricité positive qu'entraînent vers la droite les secteurs qui touchent successivement b_3. Cette électricité positive arrive en regard du balai b_2, agit sur lui par influence; b_2 devient négatif et l'opposé b_1 positif; le secteur qui est en contact avec b_2 se charge négativement *comme l'était m.* En même temps, les secteurs qui touchent b_1 se chargent positivement, et transportent de l'électricité

positive de gauche à droite. La charge induite de b_3 a été accompagnée d'une charge contraire de l'extrémité b_4 du même conducteur.

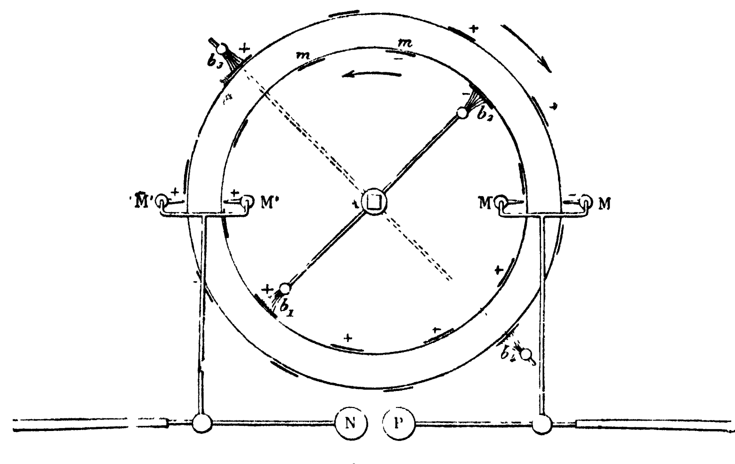


Fig. 717.

Les électricités amenées devant les peignes sont neutralisées, d'une part, par l'électricité positive qu'elles soutirent par influence du peigne M', et d'autre part, par l'électricité négative qui s'écoule de même du peigne M. Dans le trajet de M en b_4, les secteurs extérieurs sont neutres; dans le trajet de M' en b_1, ce sont les secteurs intérieurs. Après avoir perdu leurs charges en passant entre les peignes, les secteurs prennent plus loin des électricités contraires par l'action des balais.

Les électricités contraires développées dans les conducteurs P et N qui prolongent les peignes se recombinent à travers les boules de décharge. Si l'on écarte ces boules, on obtient des étincelles intermittentes.

624. Réversibilité des machines à influence. — Si l'on réunit aux pôles d'une forte machine à influence en activité les pôles d'une machine plus petite (débarrassée de ses courroies pour être plus mobile), les disques de cette dernière se mettent à tourner. Les collecteurs de la première machine se déchargent en faisant tourner la deuxième. La première machine convertit du travail en énergie électrique, la seconde convertit de l'énergie électrique en travail et peut servir de moteur.

ÉLECTROPHORE

625. L'électrophore est une machine à influence composée de deux disques superposés : 1° un gâteau *de résine* S, plan, coulé dans un moule conducteur; 2° un plateau de bois C, *recouvert*

d'une feuille d'étain et soutenu par une tige isolante. Le diamètre du plateau est un peu plus petit que celui du gâteau (fig. 718).

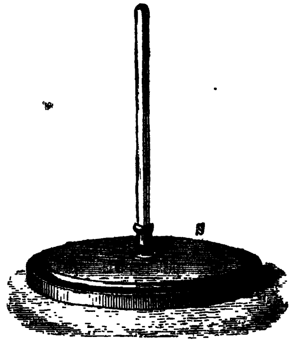


Fig. 718.

Fonctionnement. — On charge négativement le disque de résine en le battant avec une peau de chat et, sur la résine électrisée, on pose le plateau d'étain. Une très mince couche d'air étant interposée entre la résine et l'étain, l'électricité négative de la résine agit *par influence* sur le plateau, et attire de l'électricité positive sur la surface inférieure, la surface supérieure devient négative. Si le plateau était alors soulevé, il reviendrait à l'état neutre. Avant de le soulever, on le touche avec le doigt (fig. 719). L'électricité néga-

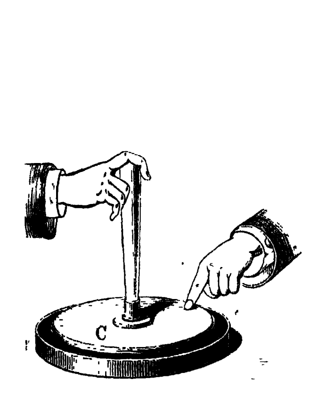


Fig. 719.

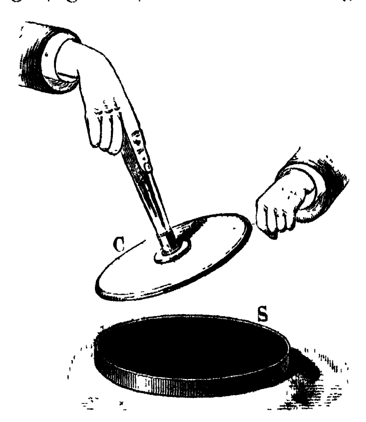


Fig. 720.

tive va dans le sol : l'électricité positive du plateau est retenue par la charge négative de la résine. Le potentiel du plateau est alors nul. Le doigt étant éloigné et le plateau étant ensuite soulevé par sa tige isolante, son électricité positive M se répartit librement sur les deux faces. Le plateau, de capacité C, prend un potentiel V, d'après la relation $M = CV$ et peut alors exercer une influence sur un conducteur. On en tire en effet une étincelle avec le doigt (fig. 720).

En replaçant le plateau sur la résine, *en le touchant ensuite avec le doigt, puis en le soulevant,* on en tire une nouvelle étincelle. L'électrophore fonctionne ainsi longtemps par influence; le frottement initial du disque de résine ne se répète pas.

On peut transformer l'électrophore en une véritable machine électrique : au lieu de tirer une étincelle du plateau C après l'avoir touché avec le doigt, puis soulevé, on le transporte à l'intérieur d'un large *cylindre de Faraday;* la charge entière du plateau passe sur le cylindre. On renouvelle la charge du plateau à la façon ordinaire, et, à chaque fois, on transmet sa charge au cylindre qui additionne les charges et sert de *collecteur.*

Source de l'énergie électrique. — L'électricité de la résine agit *par influence,* sans perte ni gain ; elle n'entretient pas l'énergie des étincelles. Quand on soulève le plateau, outre le travail mécanique nécessaire pour élever son poids, on dépense un travail pour *vaincre l'attraction qui s'exerce entre les charges contraires de la résine et du plateau.* Ce dernier travail a pour effet d'élever la charge positive du plateau à un potentiel V ; il se transforme ainsi en une énergie potentielle qui disparaît dans une décharge. Quand on redescend le plateau déchargé, le travail de la pesanteur est seul restitué (1).

CONDENSATEURS

626. *Un condensateur est un appareil de grande capacité qui consiste en deux surfaces conductrices parallèles ou* **armatures**, *séparées par une mince couche isolante* (air, verre, mica, etc.).

L'une des armatures, le **collecteur** A, communique avec une source d'électricité; l'autre armature, le **condenseur** B, est reliée au sol. *Par l'influence* du condenseur, la capacité du collecteur augmente (**613**) et il reçoit de la source, en présence du condenseur, une charge M beaucoup plus forte que la charge *m* qu'il prend quand il est seul. Le rapport $\frac{M}{m}$ est le *pouvoir condensant.*

Théorie. — Nous emploierons un condensateur formé de deux plateaux métalliques mobiles (2) (fig. 721). Chacun des plateaux porte sur sa surface externe un petit pendule à fil de lin conducteur.

Charge du collecteur sans condensation. — Le condenseur étant éloigné, relions, en communication lointaine, le collecteur au pôle positif d'une source S dont le pôle négatif va au sol. Le collecteur prend une

(1) Comme source d'électricité, en raison des opérations multiples de son emploi, l'électrophore est très imparfait. Toutefois, c'est en perfectionnant son fonctionnement qu'on est arrivé aux puissantes machines à influence actuelles. Dans les machines à influence on trouve : un système *inducteur*, remplaçant le gâteau de résine, un conducteur *induit* comme le plateau et un *collecteur*, qui rappelle le cylindre de Faraday.

(2) En intercalant une lame de verre I, on évite qu'une étincelle éclate aussi facilement entre les deux plateaux.

charge $m = c$ V ; au potentiel V du pôle positif de la source S ; c est la capacité du collecteur *soustrait à toute influence.*

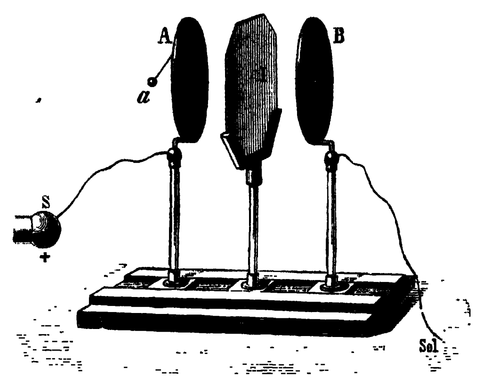


Fig. 721.

Charge du collecteur avec condensation. — Supprimons la communication du collecteur avec la source S et approchons le condenseur relié au sol, l'électricité négative développée par influence sur le condenseur fait décroître le potentiel du collecteur et le pendule a s'abaisse. La charge m du collecteur n'ayant pas varié, la *diminution de son potentiel* correspond à un *accroissement de sa capacité.* Soit V_1 le potentiel actuel et C la nouvelle capacité : $m = CV_1$.

Le collecteur étant de nouveau réuni à la source, une nouvelle charge le ramène *au potentiel* V de la source et le pendule a remonte. La charge actuelle $M = CV$ est supérieure à m puisque C est supérieur à c. Les armatures sont à ce moment fortement chargées ; leurs électricités opposées, par leur attraction mutuelle, s'accumulent sur les surfaces en regard.

Écartement des plateaux. — Si l'on supprime les communications avec la source et avec le sol et que l'on écarte assez les deux plateaux pour qu'ils ne s'influencent plus : 1° le pendule a diverge fortement, car le collecteur a repris sa capacité c ; sa charge positive $M = cV'$ élève son potentiel à une valeur V' bien supérieure à V ; 2° le pendule b diverge fortement, la charge négative considerable du condenseur porte son potentiel à une valeur $- V''$ (1).

Les charges du collecteur et du condenseur sont de *signes contraires ;* en effet, un bâton de résine attire a et repousse b.

La charge du collecteur, avec condensation, est $M = CV$, sa charge sans condensation était $m = cV$; le *pouvoir condensant* $\frac{M}{m} = \frac{C}{c}$.

Capacité. — CV *est la charge du collecteur pour une différence de potentiel* V *entre les armatures ;* la capacité C est égale à la charge pour une différence de potentiel égale à l'unité.

Si le collecteur communique avec l'un des pôles d'une source au potentiel V_1 et le condenseur avec l'autre pôle au potentiel V_2, ils

(1) En employant une très faible source S d'électricité, les indications du pendule a seraient données avec plus de précision par des électroscopes à feuilles en communication lointaine avec les plateaux. Les divergences des feuilles correspondraient exactement aux potentiels V, V_1 et V'. Les indications du pendule b seraient, de même, données par un électroscope à communication lointaine relié au condenseur B.

prennent respectivement les mêmes potentiels que les deux pôles. Leur différence de potentiel est $V_1 - V_2$, leur charge est $C(V_1 - V_2)$.

La capacité du collecteur est *proportionnelle à sa surface*. Pour une épaisseur uniforme et faible de la lame isolante, la capacité *varie en sens inverse de cette épaisseur*.

627. Bouteille de Leyde. — La bouteille de Leyde (fig. 723) est une bouteille en verre mince, à goulot étroit. Son bouchon est traversé par une tige de métal qui se termine en haut par un bouton et plonge en bas dans des *feuilles de clinquant* dont la bouteille est remplie (fig. 722). A l'extérieur, sur le fond et sur le pourtour, jusqu'à une certaine distance du goulot

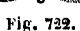


Fig. 722.



Fig. 723

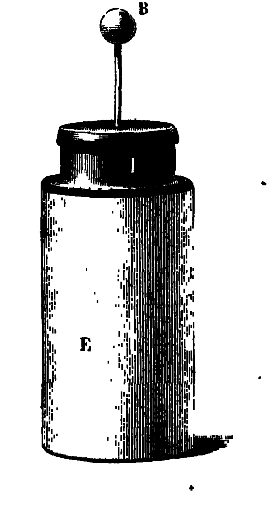


Fig. 724.

la bouteille est couverte d'une *feuille d'étain*. La partie supérieure de la bouteille, non recouverte d'étain, est vernie à la gomme laque.

Une **jarre** est une bouteille à large ouverture (fig. 724), tapissée d'étain à l'intérieur et à l'extérieur. La tige de métal se termine par une chaîne qui repose sur l'étain intérieur.

628. Charge d'un condensateur. — Pour charger un condensateur, on fait communiquer l'une des armatures avec l'un des pôles d'une machine électrique et l'autre armature avec l'autre pôle (ou avec le sol si le second pôle de la machine est relié au sol) (fig. 725). La durée de la charge croît avec la capacité du collecteur, elle diminue si le débit de la machine augmente.

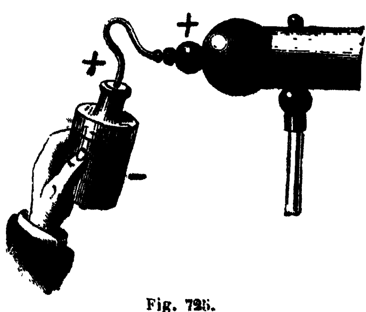


Fig. 725.

Dans le cas où le condenseur *entoure* complètement le collecteur, la surface interne du condenseur est, d'après le théorème de Faraday, couverte d'une charge négative *égale* à la charge positive du collecteur. Ces deux couches intérieures du condensateur sont alors sans action à l'extérieur; l'armature externe forme écran (**592**). Une bouteille de Leyde diffère peu d'un condensateur fermé.

Comme les deux couches intérieures d'un condensateur fermé ont une distribution indépendante de toute électricité extérieure, la densité électrique est uniforme sur deux armatures sphériques concentriques. La densité électrique est également uniforme sur deux grandes armatures planes et parallèles.

629. Rôle du diélectrique. — La lame isolante n'a pas un rôle passif. En effet, un condensateur à plateaux et à lame d'air étant chargé, si l'on glisse entre ses armatures une lame diélectrique, le pendule du collecteur tombe; on en conclut que le potentiel du collecteur a diminué ou que *sa capacité a augmenté*. Avec un isolant solide, la capacité C est donc plus grande qu'avec une couche d'air de même épaisseur. D'autre part, à épaisseur égale, les isolants solides offrant à la décharge une plus grande *résistance* que l'air, on peut augmenter $V_1 - V_2$; pour ces deux raisons, un isolant solide permet d'accroître notablement la charge $C(V_1 - V_2)$.

Pouvoir inducteur spécifique. — On appelle pouvoir inducteur spécifique d'un diélectrique le nombre K, par lequel on doit multiplier la capacité d'un condensateur à air pour obtenir la capacité d'un condensateur formé avec une *même épaisseur* du diélectrique. Pour une même différence V de potentiel, CV étant la charge d'un condensateur à air, KCV est la charge du condensateur à lame isolante. Pour les gaz, $K = 1$; pour l'ébonite, et le verre ordinaire K est voisin de 3, pour le mica, il varie de 5 à 8.

630. Expression de la charge d'un condensateur. —

Pour une épaisseur e de la lame diélectrique et une surface S des armatures en regard, $C = \frac{KS}{4\pi e}$ et la charge est $\frac{KSV}{4\pi e}$.

Calcul de la charge. — Le calcul demande quelques préliminaires.

1° **Action** sur une masse électrique $+1$ **d'un plan indéfini uniformément électrisé.** — L'action Pf exercée sur une masse $+1$, située en P, par un petit élément de surface s est $\frac{\sigma s}{r^2}$ (σ densité électrique sur le plan, $PA = r$).

La composante normale au plan, $\frac{\sigma s}{r^2}\cos\alpha$, est seule efficace, car l'élément s et l'élément symétrique s', de même surface, donnent, en P des com-

posantes horizontales, de sens contraires, qui s'annulent (fig. 726).

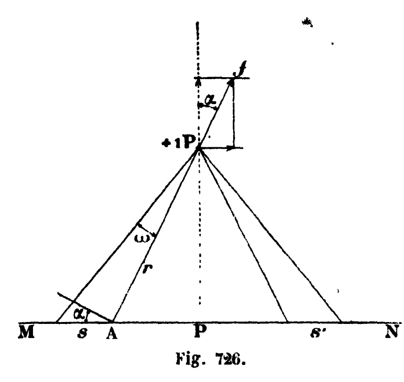


Fig. 726.

Comme $s = \omega r^2 \cos \alpha$ (ω angle sous lequel l'élément superficiel s est vu du point P), la valeur de la composante normale est $\sigma\omega$. L'action totale, égale à la somme des actions efficaces de tous les éléments du plan indéfini, est $2\pi\sigma$ ($\Sigma\omega = 2\pi$), quelle que soit la distance du point P au plan.

Si le point P est voisin du plan, il n'est pas nécessaire que le plan ait une grande étendue pour que son action sur la masse + 1 en P soit égale à $2\pi\sigma$ (2π est l'angle sous lequel le plan est vu du point P).

2° **Les charges contraires des faces en regard** des deux armatures **ont la même densité.** — Supposons le condenseur relié au sol, toute son électricité est accumulée sur sa face supérieure par l'attraction du collecteur et l'action totale qu'éprouve un point a, où l'on suppose une masse + 1, est $2\pi\sigma + 2\pi\sigma'$. Le premier terme est l'action de la couche positive du collecteur et le second terme est l'action de la couche négative du condenseur. La somme des actions devant être nulle puisque l'équilibre est établi, on doit avoir $\sigma' = -\sigma$. Les charges totales sont $S\sigma$ et $-S\sigma$.

3° **L'action F exercée par les deux couches** sur une masse + 1, en P, dans le diélectrique, est $4\pi\sigma$.

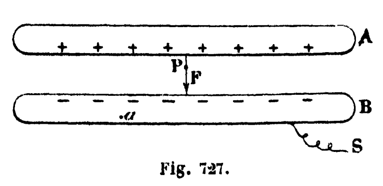


Fig. 727.

C'est, en effet, la somme de deux actions *de même sens* et égales chacune à $2\pi\sigma$, elles sont exercées, l'une par la couche positive du collecteur et l'autre par la couche négative du condenseur. La force F est normale aux deux plans et a la même valeur en tout point du diélectrique.

4° Le **travail dépensé** pour amener une masse + 1 de B en A est Fe (e épaisseur du diélectrique). En effet, ce travail a une valeur indépendante du chemin parcouru et, sur le trajet e d'une normale aux deux plans, le travail de la force F, constante et normale, est Fe.

5° Le **potentiel** V en A ou le travail dépensé pour amener une masse + 1 sur le collecteur depuis le sol ou, depuis la surface B du condenseur (qui est au potentiel du sol), est $V = Fe = 4\pi\sigma e$. Donc, $\sigma = \frac{V}{4\pi e}$.

Si le diélectrique interposé entre les deux armatures a une constante K, on a $\sigma = \frac{VK}{4\pi e}$ d'où, pour la charge, $M = \frac{KSV}{4\pi e}$.

Quelle que soit la forme du condensateur sphérique, cylindrique ou autre, si la lame diélectrique est très mince, on démontre que la densité électrique sur chaque armature est toujours égale à $\frac{VK}{4\pi e}$.

DÉCHARGE D'UN CONDENSATEUR

631. Décharge rapide. — Une décharge rapide a lieu en réunissant les armatures avec un excitateur. Un **excitateur** est formé de deux arcs en laiton C et C′, munis de manches isolants et reliés par une charnière qui permet de les écarter (fig. 728) : ils portent chacun une boule à leur extrémité. On touche l'une des armatures du condensateur avec l'une des boules et on approche l'autre boule de la seconde armature. Avant le contact, à une distance invariable pour une même charge, une étincelle jaillit. Cette étincelle accompagne un transport d'électricité positive de l'armature au potentiel le plus élevé vers l'autre armature.

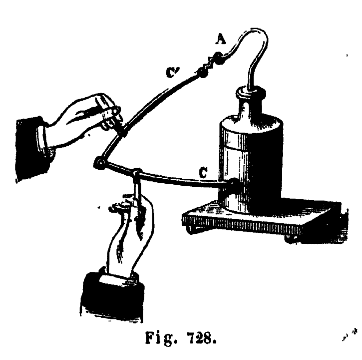


Fig. 728.

L'électricité se porte sur la lame isolante. — Un condensateur à plateaux mobiles étant chargé, si l'on écarte les plateaux, leurs pendules divergent faiblement. On décharge les plateaux écartés, puis on les ramène en contact avec l'isolant. En réunissant alors les plateaux par un excitateur, on obtient une vive étincelle. Les électricités étaient donc fixées sur l'isolant.

Bouteille à armatures mobiles. — Une bouteille à armatures mobiles permet aussi de montrer l'adhérence des *électricités à la lame isolante*. L'armature intérieure D est un vase conique en métal qui entre dans un gobelet de verre S ; celui-ci est reçu par un vase métallique C, qui sert d'armature extérieure (fig. 729). *Après avoir chargé* le condensateur B ainsi formé, on le pose sur un gâteau isolant et on enlève à la main successivement le vase intérieur, puis le gobelet de verre ; *on décharge les deux armatures* mé-

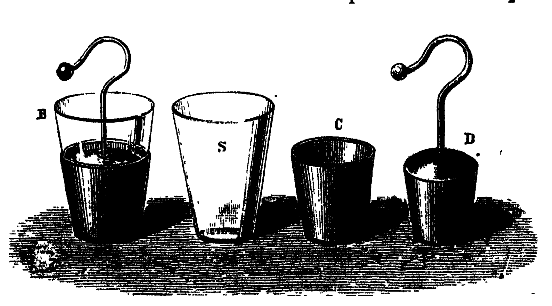


Fig. 729.

talliques en les touchant. En reconstituant ensuite le condensateur, on obtient avec l'excitateur une forte étincelle.

Étincelles résiduelles. — Une seule décharge ne ramène pas à l'état neutre un condensateur à lame isolante solide. Après quelques instants, on peut obtenir une deuxième étincelle plus faible, puis, plus tard, une troisième. Les étincelles *résiduelles* font admettre que les électricités pénètrent jusqu'à une certaine profondeur dans l'isolant. La mauvaise conductibilité de l'isolant n'a pas permis aux électricités de se réunir complètement dans une première décharge. On n'obtient pas d'étincelles résiduelles avec un isolant gazeux.

632. Condensateurs en batterie. — A une bouteille de Leyde de grande dimension qui serait incommode, on préfère une *batterie* formée de jarres. Les armatures internes, réunies par des tiges de métal, convergent vers une boule centrale que surmonte un anneau. Les jarres sont disposées dans une caisse en bois dont le fond, recouvert d'étain, relie les armatures externes à deux poignées métalliques fixées aux parois de la caisse. Les *armatures internes n'en forment ainsi qu'une;* il en est de même des armatures externes. Une machine à influence charge rapidement une batterie. On relie l'anneau à l'un des pôles et une des poignées extérieures à l'autre pôle et au sol. Si l'attraction des électricités contraires entre les deux faces d'une des lames isolantes devient trop forte, la paroi de verre est percée (1) et la jarre est hors d'usage. Pour prévenir cette rupture, un électroscope à cadran E, placé sur l'armature interne, fait connaître à tout instant l'excès de potentiel de l'armature interne sur le potentiel du sol (fig. 730).

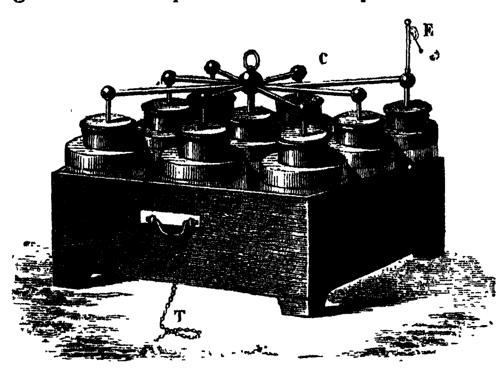


Fig. 730.

Condensateurs de grande capacité. — Les condensateurs industriels sont formés de feuilles d'étain alternant avec des feuilles

(1) S'il faut une différence de potentiel ΔV entre les armatures pour produire une décharge disruptive à travers un diélectrique d'épaisseur e, la résistance du diélectrique à la décharge disruptive ou sa *rigidité électrostatique* est le quotient $\frac{\Delta V}{e}$.

de mica ou de papier paraffiné (fig. 731); les feuilles d'étain d'ordre impair a sont reliées d'un côté en A et forment l'une des armatures; les feuilles d'ordre pair b, réunies entre elles, forment l'autre armature B. On obtient ainsi *une très grande capacité sous un petit volume.*

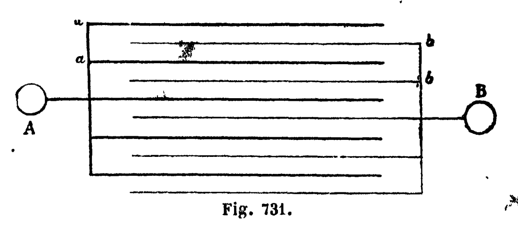


Fig. 731.

633. Énergie d'un condensateur. — Un condensateur acquiert par sa charge une *énergie potentielle.* Cette énergie potentielle s'annule, comme la charge, après la réunion des armatures.

L'énergie d'un condensateur est *la somme* des énergies de ses armatures. Appelons V le potentiel du collecteur, C sa capacité, l'énergie du collecteur est $\frac{1}{2}MV = \frac{1}{2}CV^2$; le potentiel du condenseur étant nul, son énergie est nulle. Si les deux armatures ont été réunies, pour la charge, à deux pôles de potentiels V_1 et V_2, l'énergie du condensateur est $\frac{1}{2}M(V_1 - V_2)$ ou $\frac{1}{2}C(V_1 - V_2)^2$.

La charge d'une batterie de n jarres est $M = ncV$, où c désigne la capacité d'une jarre; par suite, son énergie $\frac{1}{2}MV = \frac{1}{2}ncV^2$.

634. Condensateurs en série (fig. 732). — Dans ce mode d'association, on réunit l'armature interne i_1 du premier condensateur à l'un des pôles d'une source S, l'armature externe e_1 du premier à l'armature interne i_2 du deuxième, l'armature externe e_2 du deuxième à l'armature interne i_3 du troisième, l'armature externe de la n^e au sol ou au deuxième pôle de la source.

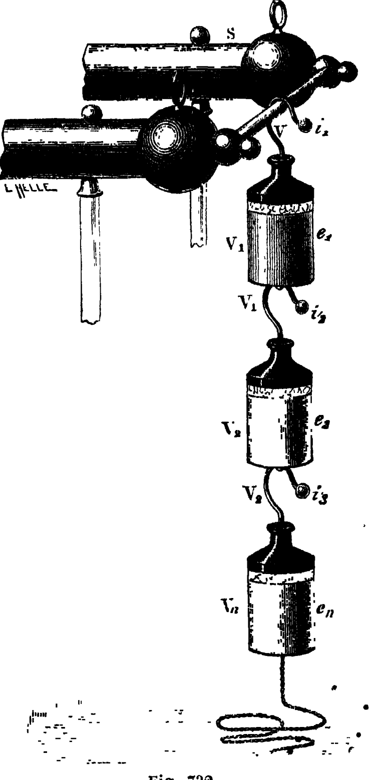
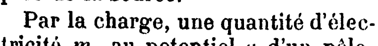


Fig. 732.



Par la charge, une quantité d'électricité m, au potentiel v d'un pôle de la source, arrive sur l'armature

interne; elle induit deux charges $-m$ sur e_1 et $+m$ sur i_2 (e_1 et i_2 sont au potentiel commun v_1); en passant sur i_2, m induit $-m$ sur e_2 et $+m$ et i_3 (e_2 et i_3 sont au potentiel v_2); en passant sur i_3, m induit $-m$ sur e_3 et $+m$ et i_4........; $v - v_1$ est la différence de potentiel entre i_1 et e_1; $v_1 - v_2$ entre i_2 et e_2; $v_2 - v_3$ entre i_3 et e_3........ Désignons par c_1, c_2.... c_n les capacités des condensateurs, les charges successives des n condensateurs seront :

$$(a) \left\{ \begin{array}{l} m = c_1 (v - v_1) \\ m = c_2 (v_1 - v_2) \\ m = c_3 (v_2 - v_3) \\ \dots\dots\dots\dots \\ m = c_n (v_{n-1} - v'). \end{array} \right.$$

Ce groupement est dit *en cascade*, parce qu'il y chute de potentiel d'un condensateur au suivant.

Les équations (a) s'écrivent : $\frac{m}{c_1} = v - v_1$, $\frac{m}{c_2} = v_1 - v_2, \dots \frac{m}{c_n} = v_{n-1} - v'$.

En ajoutant, on a $m \left[\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} + \dots + \frac{1}{c_n} \right] = v - v' = \frac{m}{C}$.

La *capacité* C *du condensateur unique*, qui aurait la même charge et la même différence de potentiel que le système des condensateurs en cascade, est $\frac{1}{C} = \sum \frac{1}{c_1}$. D'autre part, on peut écrire :

$$v - v' = v - v_1 + v_1 - v_2 + \dots v_{n-1} - v'$$

La différence de potentiel $v - v'$ étant répartie sur n épaisseurs de verre, le système peut supporter une différence de potentiel n fois plus forte qu'une batterie.

Avec des condensateurs identiques, $\frac{mn}{c} = v - v' = \frac{m}{C}$ et $C = \frac{c}{n}$.

La première armature donne seule un terme pour l'énergie du système.

$$\frac{1}{2} mv = \frac{1}{2} \frac{c}{n} v^2, \text{ si } v' = o.$$

Les autres armatures ne produisent aucun travail à la décharge; en effet, e_1 et i_2 forment un conducteur soumis à l'influence dont la charge totale est nulle, de même e_2 et i_3... : pour la dernière armature le potentiel est nul. Si v' n'est pas nul, l'énergie est $\frac{1}{2} m (v - v')$.

ÉLECTROSCOPE CONDENSATEUR

635. L'électroscope condensateur est un électroscope à feuilles d'or dont la boule est remplacée par un disque métallique; sur ce disque repose un second disque semblable, muni d'un manche isolant. Les faces en regard des deux disques sont *séparément* recouvertes d'une couche de vernis; les deux couches de vernis forment la lame

isolante d'un condensateur qui a les disques pour armatures.

Usage. — L'électroscope condensateur sert à reconnaître *des différences de potentiel très faibles dues à des sources continues,* telles que des éléments de pile. On met en contact la face inférieure du disque inférieur avec l'un des pôles de la source et la face supé-

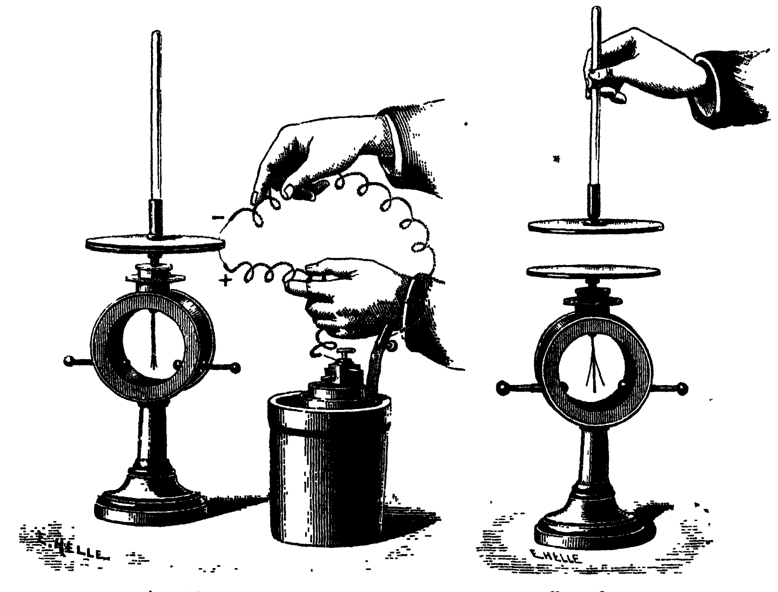


Fig. 733. Fig. 734.

rieure du disque supérieur avec l'autre pôle (1) (fig. 733), il y a condensation. En soulevant alors le disque supérieur (2) (fig. 734), la charge du disque inférieur devient libre et se répand sur l'électroscope. Une source qui n'aurait rien donné à un électroscope ordinaire détermine, après condensation, une divergence appréciable.

On reconnaît le signe de l'électricité du disque inférieur comme sur un électroscope ordinaire. En mettant ensuite le disque supérieur en contact avec le bouton d'un électroscope, on constate qu'il porte une charge contraire à celle du disque inférieur.

636. Déformation électrique de la lame isolante d'un condensateur. — Imaginons deux réservoirs A et B reliés, par des tuyaux flexibles *t*, aux parois opposées d'une cavité qui est divisée en deux parties par un

(1) Ou avec le sol si le deuxième pôle est lui-même relié au sol.

(2) Comme les électricités contraires se portent sur la lame isolante, si le plateau supérieur était seul verni, on emporterait avec lui, en le soulevant, les deux électricités condensées et le plateau inférieur resterait sans charge.

diaphragme CD imperméable, mais élastique (fig. 735). Le diaphragme subit, de part et d'autre, des pressions égales et reste *plan* quand les réservoirs sont remplis d'eau à une même hauteur.

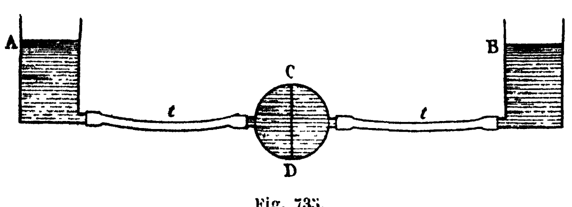


Fig. 735.

Si l'on monte A ou si l'on descend B (on peut effectuer les deux mouvements simultanément) (fig. 736), le diaphragme est soumis à une différence de pression qui le fait fléchir et il se produit deux courts déplacements d'eau, l'un de A vers CD, l'autre de CD vers B. La flexion définitive du diaphragme croît avec la différence des niveaux en A et B.

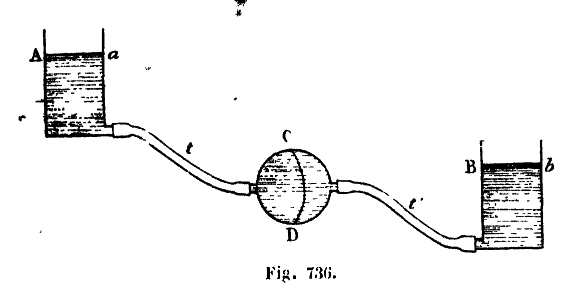


Fig. 736.

La différence de potentiel entre les armatures d'un condensateur est comparable à une différence de niveaux liquides, et le diélectrique au diaphragme. Les courants électriques de charge du condensateur correspondent aux courants liquides qui accompagnent la flexion du diaphragme.

Les courants de décharge d'un condensateur sont analogues aux courants liquides, inverses des courants de flexion, qui circulent dans les tubes *t* lorsque les deux réservoirs sont ramenés au même niveau et que l'élasticité du diaphragme lui a fait reprendre sa position initiale.

Une *décharge disruptive*, due à une trop grande différence de potentiel des armatures, brise un diélectrique comme une trop forte différence de niveau entre les réservoirs fait éclater le diaphragme (1).

L'étude du condensateur à armatures mobiles a localisé l'énergie d'un condensateur dans son diélectrique. L'assimilation précédente présente cette énergie comme une énergie de déformation du diélectrique.

EFFETS DES DÉCHARGES ÉLECTRIQUES

L'énergie mécanique dépensée dans la charge d'un conducteur électrisé s'y est accumulée sous forme d'énergie potentielle. Dans la décharge, cette énergie produit divers effets : *lumineux*, *calorifiques*, *chimiques*, *mécaniques*, *physiologiques*.

---

(1) Un diélectrique qui n'est pas un isolant parfait serait assimilé à un diaphragme poreux qui laisse filtrer lentement l'eau d'une face à l'autre.

637. Effets lumineux. — L'**étincelle** est un phénomène lumineux qui accompagne le passage de l'électricité, à travers un isolant, entre deux conducteurs qui offrent une différence de potentiel suffisante. Les deux conducteurs sont mis en communication momentanée par l'étincelle elle-même et leurs potentiels s'égalisent.

La *longueur* de l'étincelle, ou la **distance explosive**, *croît avec la différence de potentiel* des conducteurs entre lesquels elle éclate. *Quelle que soit la capacité* des conducteurs, *une même distance explosive* correspond *à une même différence de potentiel.*

La *largeur* de l'étincelle croît avec la quantité d'électricité qui passe. Entre des conducteurs de grande capacité, une étincelle a la forme d'un trait rectiligne *épais* (fig. 737); si la capacité diminue, le trait devient *grêle,* sinueux et ramifié (fig. 738).

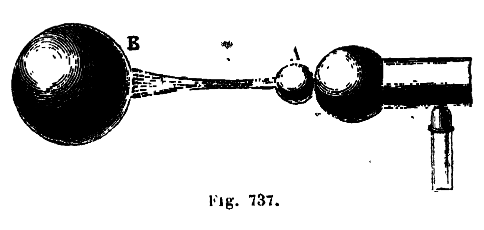


Fig. 737.

Dans une machine électrique, on remplace un flux d'étincelles grêles par des étincelles nourries et plus rares en *augmentant la capacité des collecteurs.* Au lieu d'employer de grands cylindres comme dans la machine de Ramsden, on obtient de grandes capacités sous un petit volume en associant chaque collecteur (fig. 739) à l'armature interne d'une *bouteille de Leyde* (association en série).

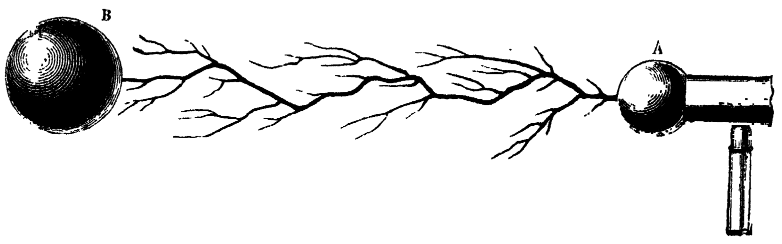


Fig. 738.

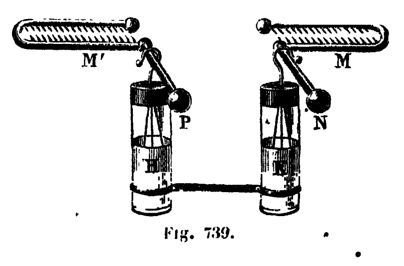


Fig. 739.

Les électricités contraires des armatures se réunissent chaque fois qu'une étincelle éclate entre les boules P et N. En même temps, les électricités devenues libres sur les armatures externes H et K, se neutralisent à travers un conducteur qui les relie.

La *durée* d'une étincelle est une fraction de seconde excessivement petite. La *couleur de l'étincelle* dépend de la nature des particules arrachées aux conducteurs et portées à l'incandescence par la décharge. Le spectre de l'étincelle présente les raies de la vapeur du métal des conducteurs et, en même temps, les raies de l'air.

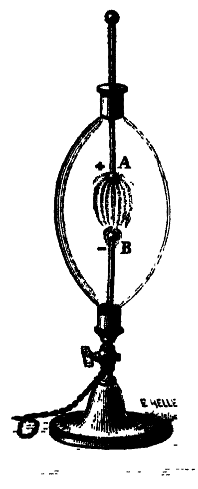


Fig. 740.

Lueurs dans les gaz. — L'électricité qui s'écoule par une pointe offre, dans l'obscurité, une teinte violacée changeant de forme (**623**) avec le signe de l'électricité (*aigrettes, points brillants*). Ces lueurs deviennent des effluves silencieux quand elles s'étalent dans les gaz raréfiés.

Pour une même différence de potentiel, la longueur de l'étincelle diminue dans les gaz comprimés; elle est *beaucoup plus grande dans les gaz raréfiés* qu'à l'air libre. On l'observe dans différents gaz avec l'**œuf électrique** (fig. 740); c'est un globe ovoïde de verre, porté sur un pied de cuivre et traversé à ses extrémités par deux tiges métalliques que terminent des boules; la tige A est mobile dans une boîte à cuir. Après avoir réduit la pression à quelques millimètres de mercure, on dirige une décharge par les deux tiges, il apparaît, entre les deux boules intérieures, une gerbe dont la couleur varie avec le gaz.

L'étude des décharges électriques dans les gaz raréfiés sera complétée à propos de la bobine d'induction (**866**).

Tubes étincelants. — On obtient un grand nombre d'étincelles par une seule décharge en multipliant les solutions de continuité du conducteur traversé. Les tubes étincelants sont des tubes de verre à l'intérieur desquels sont collés en spirale de petits losanges d'étain à pointes très rapprochées (fig. 741). Le tube porte à ses extrémités deux pièces métalliques A et B que l'on relie aux deux armatures d'un condensateur. Éclatant entre les intervalles successifs des losanges, les étincelles donnent dans l'obscurité la sensation d'une ligne lumineuse continue.

638. Effets calorifiques. — **Inflammation.** — L'étincelle électrique est utilisée pour enflammer des corps combustibles et particulièrement des mélanges gazeux, tels qu'un mélange d'hydrogène et d'oxygène. C'est ainsi qu'on réalise habituellement la ***synthèse de l'eau dans l'eudiomètre.***

Fig. 741.

Le **pistolet de Volta** détermine une combustion analogue. Un vase métallique A, contenant un mélange d'air et de gaz d'éclairage, porte latéralement une tubulure dans laquelle est mastiqué un tube de verre; ce tube est traversé par une tige métallique D, qui se termine en E, à une petite distance de la paroi opposée (fig. 742). On enflamme le mélange gazeux en faisant jaillir une étincelle électrique entre la tige et la paroi. Le dégagement de chaleur qui accompagne la combustion donne lieu à une grande expansion des gaz qui projette le bouchon B.

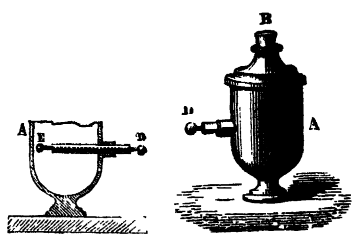


Fig. 742.

Échauffement des conducteurs. — Les décharges électriques échauffent les conducteurs qu'elles traversent. On dirige la décharge d'une batterie avec un **excitateur** formé de deux tiges métalliques A et B montées à charnières et supportées par des pieds isolants (fig. 743). A leurs extrémités voisines, les tiges sont terminées par des boules, et leurs extrémités opposées sont reliées, au moyen de chaînes, aux armatures de la batterie. Une tablette T peut recevoir les corps sur lesquels on opère.

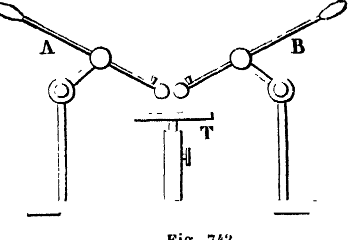


Fig 743.

Un fil métallique fin *db*, tendu entre les deux boules, peut être fondu par la décharge. On laisse dans le circuit un intervalle d'air

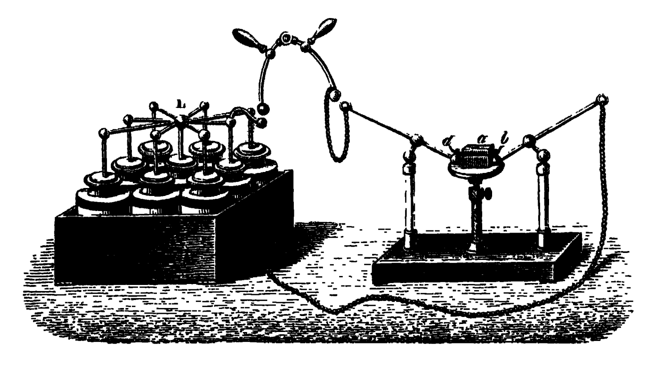


Fig. 744.

à travers lequel on effectue la décharge avec un excitateur à manches de verre (fig. 744).

La chaleur dégagée dans un circuit de décharge ne se distribue

pas également dans les divers conducteurs, mais **proportionnellement à leurs résistances** (**704**) : un fil de petite section s'échauffe plus qu'un gros fil de même nature.

La chaleur dégagée est *équivalente* à l'énergie disparue.

639. Mesure de l'énergie d'une décharge. — Lorsque les décharges des batteries ont lieu par des tiges métalliques de fort diamètre, l'échauffement est très faible, l'énergie de la décharge se dépense alors dans l'étincelle ; mais si un fil fin est intercalé dans le circuit, la plus grande partie de la chaleur totale de la décharge se dégage dans le fil, l'étincelle n'en prend alors qu'une faible partie. L'échauffement du fil permet, dans ce cas, de calculer, approximativement, l'énergie de la décharge.

Thermomètre à air (fig. 745). — L'échauffement par la décharge d'une batterie se mesure avec un thermomètre à air dans le réservoir duquel est tendue une fine spirale *f* de fil de platine. Les extrémités de la spirale sont assujetties à des bornes qui reçoivent les conducteurs de la batterie. L'air dilaté par l'échauffement du fil pousse une colonne d'un liquide coloré dans un tube thermométrique incliné. De l'échauffement de l'air intérieur, on déduit le nombre Q de calories dégagées ; l'énergie de la décharge est JQ (J = 4, 18).

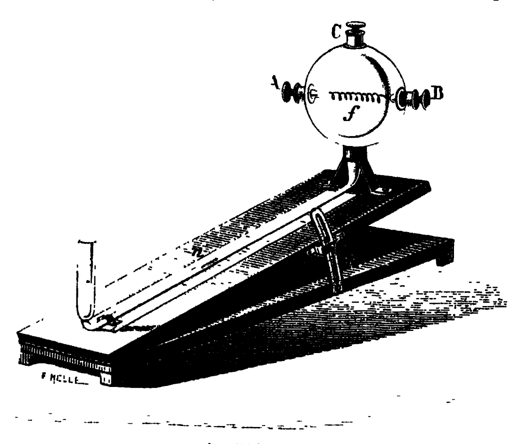


Fig. 745.

L'énergie d'une décharge est *proportionnelle au carré de la quantité d'électricité*, et *en raison inverse de la capacité* de la batterie, conformément à l'expression $JQ = \frac{M^2}{2C}$. La vérification se fait en déterminant la capacité C et la charge M.

Mesure de la capacité. — Si les bouteilles sont identiques, on peut prendre pour unité de capacité la capacité d'une bouteille ; la capacité d'une batterie est proportionnelle au nombre des bouteilles.

Mesure de la charge. — On compare les quantités d'électricité des décharges à l'aide d'une *bouteille micrométrique*, dont l'armature externe porte une petite sphère qu'une vis micrométrique permet d'approcher du bouton de l'armature interne (fig. 746).

La batterie est posée sur un support isolant ; son collecteur commu-

nique avec l'un des pôles de la source, son condenseur est relié au bouton de la bouteille micrométrique. L'armature externe de celle-ci communique avec le deuxième pôle de la source. La batterie et la bouteille micrométrique sont ainsi associées en série. Une électricité de même nom que celle du collecteur passe dans la bouteille micrométrique; une étincelle éclate entre les deux boules de la bouteille quand leur distance est la distance explosive qui correspond à leur différence de potentiel.

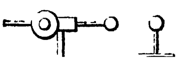


Fig. 746.

Le nombre des étincelles de la bouteille micrométrique mesure la quantité d'électricité qui charge le collecteur de la batterie.

Une bouteille micrométrique peut aussi servir à mesurer le débit d'une machine électrique (1).

640. Effets chimiques. — L'effluve électrique transforme l'oxygène en *ozone,* dont l'odeur accompagne le fonctionnement d'une machine à influence.

Par l'effet calorifique d'une longue série d'étincelles on décompose le gaz ammoniac en doublant son volume, ou on forme du peroxyde d'azote dans un mélange d'oxygène et d'azote.

L'électricité des décharges produit les effets d'*électrolyse* du courant de la pile (**710**), mais avec une bien moindre énergie.

641. Effets mécaniques. — Des effets mécaniques se produisent surtout sur les mauvais conducteurs. En faisant passer une décharge de batterie entre deux pointes métalliques qui comprennent en C, soit une lame de verre, soit une feuille de carton (fig. 747 et 748), le verre et le carton sont percés (2).

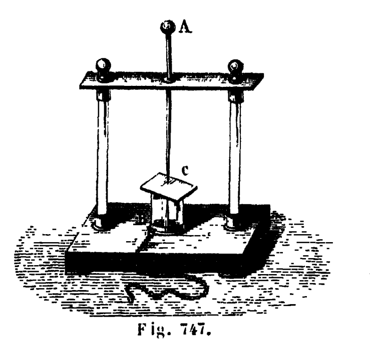


Fig. 747.

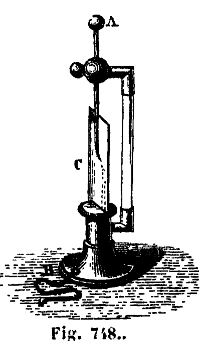


Fig. 748.

Il faut rapporter à un effet mécanique produit sur l'air le bruit qui

(1) Pour de très petites charges, un *électroscope à feuilles d'or* (fig. 690) peut servir de bouteille micrométrique. La boule de l'électroscope est réunie à la source; une des feuilles est attirée par un bouton *a* relié avec le sol et se décharge; chacune des décharges correspond à une même charge de l'électroscope.

(2) Pour une même différence de potentiel, la distance explosive est plus courte dans un solide que dans un liquide et surtout que dans un gaz. Il faut, pour percer un millimètre de verre, une distance explosive de plusieurs centimètres dans l'air.

accompagne une étincelle, et la projection latérale des fragments fondus lors de la fusion d'un fil de fer par une décharge.

Si l'on fait passer une décharge dans un fil très fin, long de 1 cm.

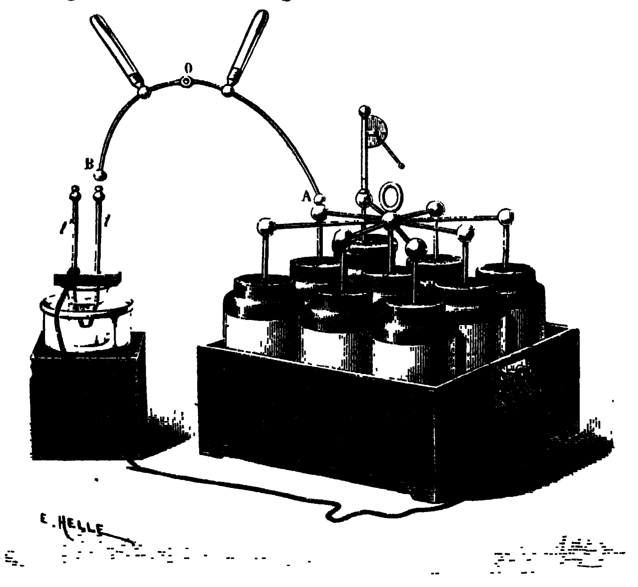


Fig. 749.

environ, tendu entre les extrémités de deux tiges *t* et *t'* plongées dans un vase de verre rempli d'eau, le fil est rompu; l'ébranlement de l'eau se transmet au vase et peut le briser (fig. 749).

642. Effets physiologiques. — Une faible étincelle produit une légère piqûre. Une forte étincelle donne une commotion.

Commotion par une décharge de condensateur. — Si l'on touche avec une main la panse et avec l'autre main le bouton d'une bouteille de Leyde chargée, la décharge a lieu par le corps qui est bon conducteur et communique une secousse au poignet, au coude, à l'épaule; elle peut même ébranler fortement la poitrine.

En formant une chaîne de personnes qui se tiennent la main, une commotion se fait sentir à toute la chaîne au moment où, la première tenant la panse, la dernière vient à toucher le bouton de la bouteille.

L'effet physiologique dépend de l'*énergie électrique* de la décharge, c'est-à-dire de la *chute de potentiel* et de la *quantité d'électricité*. On tire impunément des étincelles de 20 centimètres d'une source à faible débit; une étincelle d'un centimètre provenant d'une batterie fortement chargée est dangereuse.

Électrisation sur un tabouret isolant. — Une personne isolée, et mise en communication avec l'un des collecteurs d'une machine électrique (*bain statique*), prend son potentiel électrique; l'électricité s'écoule en aigrettes qui font dresser les cheveux et le duvet de la peau.

On localise l'écoulement en approchant d'une région du corps une pointe métallique reliée au sol. L'électricité qui s'en échappe produit un *souffle* (*vent électrique,* fig. 704). Si la pointe est mousse, il s'en échappe des *aigrettes* qui déterminent un picotement sur la peau.

En promenant sur le corps et sur les vêtements une boule de métal ou de bois reliée au sol, on obtient une succession rapide d'étincelles courtes qui rougissent la peau (*friction électrique*).

ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE

643. L'atmosphère est un champ électrique. — Un conducteur isolé, à l'état neutre, placé dans l'atmosphère par un temps serein, s'électrise négativement du côté du ciel, et positivement du côté du sol. L'atmosphère est donc un champ électrique puisqu'un conducteur y subit une influence électrique. Ce champ peut être considéré comme produit par des *masses positives* situées à une grande hauteur.

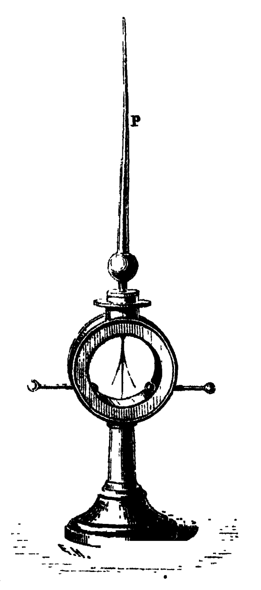


Fig. 750.

Potentiel en un point de l'atmosphère. — Le potentiel en un point A de l'atmosphère est le potentiel d'une petite sphère isolée placée en ce point (**610**). Si, pour déterminer son potentiel, on reliait cette sphère à un électroscope, le conducteur de hauteur AB, formé par la sphère et l'électroscope, prendrait un potentiel *intermédiaire* entre les potentiels des extrémités A et B, mais ce ne serait ni le potentiel en A, ni le potentiel en B.

Mesure du potentiel en un point. — 1° ***Par un conducteur en pointe.*** — En remplaçant la sphère de l'électroscope par une pointe effilée (fig. 750), on obtient le potentiel de l'air à l'extrémité de la pointe. En effet, une différence de potentiel entre la pointe et l'air qui l'entoure, donne lieu à une décomposition électrique. De là un écoulement d'électricité par la pointe, qui s'arrête quand l'équilibre est établi (1). A ce moment, la divergence des feuilles de l'électroscope ne varie plus et mesure le *potentiel du conducteur* qui est égal au potentiel de la pointe et au potentiel de l'air qui touche la pointe.

2° ***Par un écoulement d'eau.*** — Comme on ne peut réaliser une pointe

(1) Si le conducteur relié à la pointe communiquait avec le sol, un flux d'électricité, faible mais continu, parcourrait le conducteur.

parfaite, il y a, au moment où la divergence des feuilles de l'électroscope ne varie plus, une petite différence de potentiel entre la pointe et l'air qui la baigne. Aussi, préfère-t-on employer un vase R rempli d'eau, isolé et

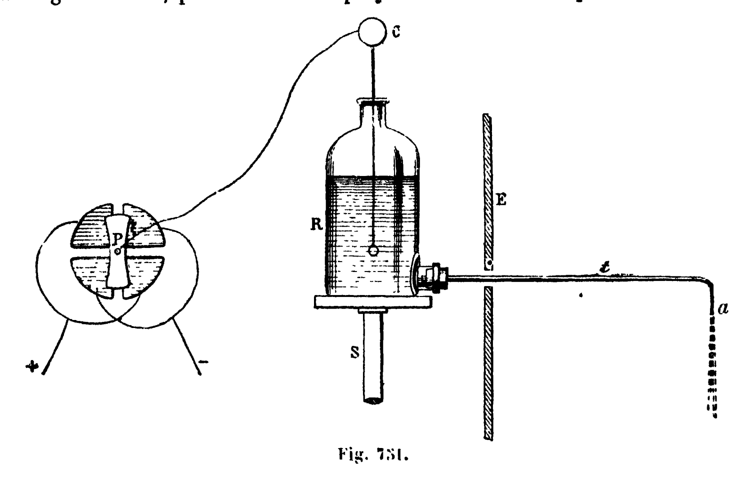


Fig. 751.

laissant écouler par un tube très mince, un filet d'eau qui se divise en gouttelettes [1] (fig. 751).

Le *potentiel de l'air est positif;* par un beau temps sans nuages, il croît proportionnellement à l'altitude. Par définition le potentiel du sol est nul.

ÉLECTRICITÉ DES ORAGES

644. Les orages sont des phénomènes électriques. —

Les nuages orageux sont des conducteurs électrisés, les **éclairs** sont de puissantes étincelles, le **tonnerre** est le bruit des éclairs.

Électrisation par l'influence d'un nuage orageux. — Un nuage orageux électrise un conducteur par influence. Pour réaliser une expérience proposée par Franklin, Dalibard, en 1752, éleva sur un support isolant une barre de fer de 13 m. de haut, terminée en pointe. En approchant de l'extrémité inférieure de cette barre une tige de

(1) Soit v le potentiel de l'air en a où une première goutte se sépare de la veine et v le potentiel de l'eau. Supposons $v' > v$; en vertu de cette différence de potentiel et de la décomposition électrique qui en résulte, il y a mouvement d'électricité positive vers l'extérieur; les gouttes, en se détachant, emportent de l'électricité positive, ce qui diminue le potentiel v' de la masse d'eau. Le potentiel de l'eau reste constant quand il est devenu égal à v, et *la déviation de l'électroscope qui lui est relié par le conducteur* C ne varie plus : elle fait connaître le potentiel en a.

L'électroscope (fig. 751) est formé d'une lame métallique horizontale P, mobile autour du fil conducteur qui la soutient et en communication avec la boule C. A l'état neutre, la lame P est en équilibre, étant également attirée par des secteurs électrisés au-dessus desquels elle est suspendue. Elle est déviée quand elle vient à être chargée elle-même d'électricité (**682**).

cuivre communiquant avec le sol, il en tira de longues étincelles (1).

Nuages positifs et négatifs. — Les régions élevées de l'atmosphère étant positives, les particules d'eau d'un nuage s'électrisent négativement à sa partie supérieure, positivement à sa partie inférieure. Le nuage reste négatif s'il communique *un instant* avec le sol, soit par contact avec une montagne, soit par une résolution partielle en pluie. Un nuage négatif charge positivement, par influence, un autre nuage qui communique momentanément avec le sol.

Éclairs. — Des éclairs jaillissent entre deux nuages électrisés à des potentiels différents et suffisamment rapprochés, ou entre un nuage électrisé et le sol.

Tantôt l'éclair est un *sillon éblouissant,* nettement limité sur ses bords; tantôt il rappelle les étincelles en *zig-zag* qui éclatent entre les pôles éloignés de fortes machines électriques; tantôt c'est une *lueur diffuse,* illuminant subitement le ciel et due à une décharge masquée par des nuages ou produite au-dessous de l'horizon.

La *durée* d'un éclair est extrêmement courte. Sa *longueur* peut être très grande; il peut être formé d'éclairs partiels qui éclatent entre des nuages voisins et reproduisent l'effet du tube étincelant.

Tonnerre. — L'éclair et le tonnerre sont *simultanés;* mais tandis que la lumière de l'éclair franchit, en un temps inappréciable, l'intervalle qui nous sépare des nuages, le fracas de la décharge met trois secondes environ à parcourir un kilomètre; aussi le tonnerre n'est entendu, qu'un certain temps après la vue de l'éclair.

Quand une décharge éclate entre plusieurs nuages consécutifs, plusieurs détonations ont lieu à la fois, mais nous les percevons successivement, car elles nous arrivent de points inégalement distants. De là des *redondances*. Les réflexions sonores multiples produisent des *roulements*, habituels dans les pays de montagnes.

Foudre. — Une décharge due à un nuage électrisé s'appelle la foudre. Si une décharge jaillit entre un nuage et le sol, on dit que la *foudre tombe.* Elle frappe de préférence les points saillants où s'accumule l'électricité contraire attirée par le nuage, tels que les sommets des montagnes, les édifices élevés, les cimes des arbres (2).

Les effets de la foudre sont les effets des décharges des batteries,

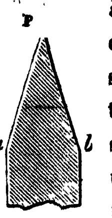
(1) La partie inférieure de la barre qui est isolée, se met en équilibre électrique avec la pointe; celle-ci a pris le potentiel de l'air au point où elle se trouve et la différence de potentiel entre la barre et le sol est considérable.

(2) L'abri offert par un arbre en temps d'orage est dangereux, car dans le cas où la foudre vient à frapper l'arbre, la décharge rencontrant un chemin plus conducteur dans le corps de la personne abritée, y passe de préférence.

mais beaucoup plus puissants : 1° effets mécaniques, spécialement sur les mauvais conducteurs : maisons écroulées, arbres brisés; 2° effets calorifiques : incendies, par l'inflammation de substances combustibles; métaux fondus et volatilisés; 3° effets chimiques : formation d'acide nitrique, d'ozone; 4° commotions renversant et frappant parfois instantanément de mort les êtres animés (1).

PARATONNERRES

645. Paratonnerre à tige. — Le paratonnerre à tige (*Paratonnerre de Franklin*) est une tige de fer de 5 à 10 mètres, terminée à sa partie supérieure par un cône P de cuivre doré et dressée verticalement sur le faîte du monument à préserver (fig. 752). A sa partie inférieure, la tige se continue par un conducteur CE en fer, *ininterrompu*, qui suit le toit et les murs de l'édifice pour se rendre dans un puits S où il se ramifie; sur son trajet ce conducteur *est relié* aux *principales pièces métalliques* de l'édifice; de la sorte, toute l'électricité développée dans ces pièces par influence s'écoule par le paratonnerre sans faire jaillir d'étincelles latérales. Si l'édifice porte plusieurs paratonnerres P et P′, ils sont reliés entre eux par des tiges métalliques AC, CB (fig. 753).



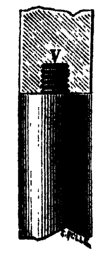


Fig. 752.

Les *sections* des tiges et des conducteurs *doivent être suffisantes* pour que le courant de décharge de la foudre ne les fonde pas; la communication avec le sol doit être, d'autre part, très soigneusement établie.

Action préservatrice. — Si, au collecteur d'une machine électrique en fonctionnement, on présente une pointe métallique tenue à la main, l'électricité qui s'écoule de la pointe, sans étincelle, décharge le collecteur en neutralisant son électricité (fig. 707). De même, un paratonnerre *prévient les décharges* en neutralisant sans bruit l'électricité des nuages; l'écoulement de cette électricité par la pointe P s'accuse par une aigrette visible dans l'obscurité.

Si la foudre éclate, le paratonnerre exerce une action *préserva-*

(1) Par le *choc en retour*, un être vivant peut éprouver une commotion sans être directement frappé. Un nuage chargé positivement et voisin d'un corps A reposant sur le sol, attire de l'électricité négative sur ce corps. Si le nuage est étendu et se décharge en un point éloigné, l'électricité accumulée sur le corps A, en face du nuage, retourne au sol et détermine un courant brusque dont la commotion peut amener la mort.

trice; étant en effet le point de l'édifice le plus voisin du nuage, le plus conducteur et le plus électrisé, il est frappé de préférence (1). Le flux brusque d'électricité qui accompagne la décharge se rend dans le sol par la tige et les conducteurs; l'édifice se trouve protégé.

On calcule l'écartement de deux paratonnerres en *admettant* qu'un paratonnerre garantit à sa base une surface circulaire dont le rayon est double de la hauteur de la tige, comptée de la pointe au sol.

Un paratonnerre est *dangereux* lorsque sa communication avec le sol est imparfaite.

646. Paratonnerre à réseau (*Paratonnerre Melsens*). — Un conducteur entouré par une enceinte métallique reliée au sol *ne subit aucune influence* des corps électrisés extérieurs; une telle enceinte forme le meilleur paratonnerre (2). La continuité de l'enceinte n'est pas nécessaire, un réseau à larges mailles suffit.

On enveloppe la surface extérieure de l'édifice de câbles métalliques AA′A″, BB′B″..., formant un *réseau* (fig. 754). Ces conducteurs communiquent avec une nappe d'eau souterraine. Les saillies de l'édifice, A, B, C, D, sont armées de petites *pointes multiples,* reliées au réseau métallique. Ces pointes laissent échapper, sous forme d'aigrettes, l'électricité développée sur l'édifice par l'influence des nuages et préviennent les accumulations de charges qui produisent les coups de foudre.

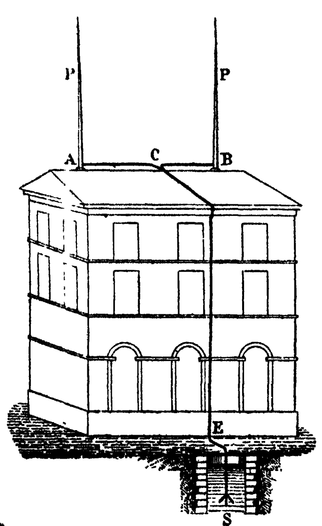


Fig. 753.

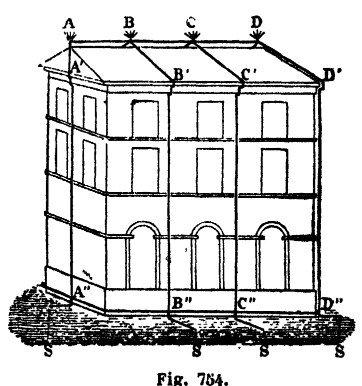


Fig. 754.

(1) Même après que sa pointe a été fondue par la foudre, le paratonnerre offre encore à l'électricité des nuages le chemin le moins résistant.

(2) Pendant un orage, les murs d'un bâtiment bien mouillés par la pluie forment une surface conductrice qui joue un rôle protecteur.

MAGNÉTISME

AIMANTS

647. Certains échantillons d'un oxyde de fer naturel (Fe^3O^4) attirent le fer. Ce sont des *aimants naturels* (pierres d'aimant). La cause de cette attraction est appelée **magnétisme** (1).

Les *aimants artificiels* sont des barreaux d'acier trempé auxquels on a communiqué, par divers procédés, la propriété d'attirer le fer.

Substances magnétiques. — Le fer n'est pas seul attirable par un aimant ou *magnétique;* le *nickel,* le *cobalt,* le *chrome,* sont magnétiques, mais à un degré bien moindre que le fer.

Pendule magnétique. — On met en évidence les attractions magnétiques à l'aide d'une petite balle de fer *b* suspendue à l'extrémité d'un fil flexible (fig. 755). A l'approche d'un aimant, ce pendule est dévié de la verticale en *b'*. L'attraction par l'aimant augmente quand sa distance à la balle de fer diminue; le pendule adhère à l'aimant s'il est entraîné jusqu'au contact.

Fig. 755.

L'attraction a lieu dans le vide comme dans l'air et à travers les substances non magnétiques, telles que le bois, le verre, le cuivre, le zinc, l'eau (2), etc.

(1) Du nom de Magnésie, ville d'Asie Mineure, aux environs de laquelle les Grecs trouvaient la pierre d'aimant. On la trouve en Scandinavie, à l'île d'Elbe, etc.

(2) Si l'on interpose une plaque de fer suffisamment épaisse entre le pendule et l'aimant, le pendule n'est plus attiré, le fer se comporte comme un *écran magnétique.*

648. Pôles magnétiques. — En présentant successivement à un pendule magnétique les différentes parties d'un aimant, on reconnaît que deux régions opposées appelées *pôles* exercent une action plus forte. Entre les deux, se trouve une *région neutre*, sans action appréciable. Sur un aimant d'acier ayant la forme d'un cylindre allongé, les points d'action maximum sont voisins des extrémités de l'axe géométrique du cylindre.

L'existence des pôles et de la région neutre se manifeste encore en plongeant un aimant dans la *limaille de fer* : elle adhère en forme de houppes, autour de deux centres voisins des extrémités, elle ne s'attache pas à la région moyenne (fig. 756).

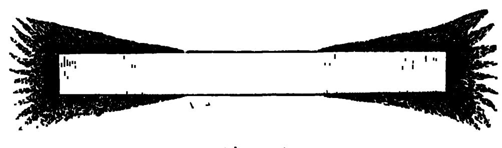


Fig. 756.

649. Orientation des aimants. — Quand on suspend, en son milieu, un barreau aimanté à un fil sans torsion, à l'aide d'un petit étrier de papier, de façon qu'il ne puisse se déplacer que dans un plan horizontal, le barreau *se dirige à peu près du nord au sud*. Tous les barreaux prennent, en un même lieu, la même direction.

On se sert souvent d'*aiguilles aimantées,* lames d'acier taillées en losange très allongé et reposant par un petit godet ou *chape,* en agate, sur un pivot vertical très aigu (fig. 757). Avec cette forme, la ligne des pôles coïncide sensiblement avec la ligne des pointes.

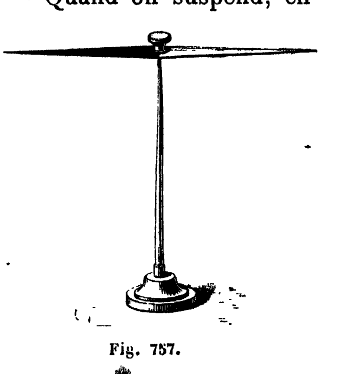


Fig. 757.

Distinction des pôles. — Si, après avoir noirci l'extrémité qui se dirige vers le nord, on dévie l'aimant et même si on le retourne, l'extrémité noircie revient toujours au nord. On appelle *pôle nord* cette extrémité, l'autre extrémité est le *pôle sud.* Bien que les deux pôles attirent également la limaille, ils ne sont pas identiques puisqu'ils prennent des directions opposées.

650. Actions réciproques des pôles de deux aimants. — De l'extrémité nord d'un aimant suspendu à un fil de soie (fig. 758), ou mobile sur un pivot, approchons le pôle nord d'un autre aimant : les deux pôles nord se repoussent vivement, les deux pôles sud mis en regard se repoussent également, mais un pôle

nord attire un pôle sud. Donc, *les pôles de même nom se repoussent et les pôles de noms contraires s'attirent.*

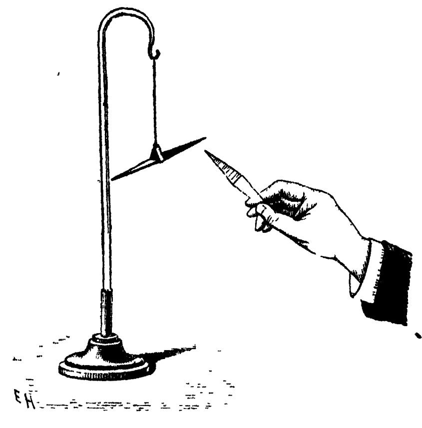


Fig. 758.

651. Aimants brisés. — On ne peut obtenir séparément, soit un pôle nord, soit un pôle sud. Si on brise un aimant, les deux fragments se comportent comme deux aimants complets offrant chacun deux pôles et une région neutre. *Les deux pôles qui prennent naissance au point de rupture sont de noms contraires.* Chacun des fragments peut à son tour être subdivisé, par rupture, en deux aimants fig. 759). En rapprochant, dans leur ordre, les fragments séparés,

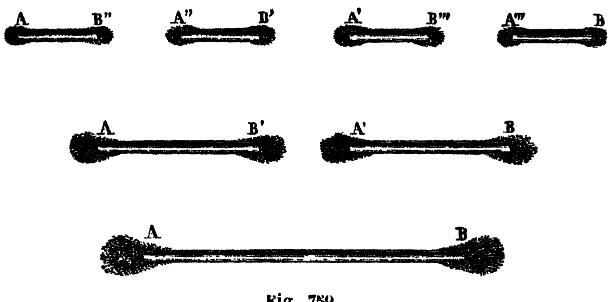


Fig. 759.

on forme une chaîne dont les pôles intermédiaires disparaissent; l'aimant primitif est reconstitué, avec ses deux pôles extrêmes.

Hypothèse sur la constitution des aimants. — D'après l'expérience précédente, on admet, qu'avant la rupture, l'aimant était

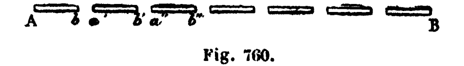


Fig. 760.

formé d'une série de *petits aimants orientés*, ayant leurs pôles nord dirigés vers l'extrémité nord et leurs pôles sud vers l'extrémité sud (fig. 760). Les pôles intermédiaires se touchent et se neutralisent; les extrémités polaires exercent seules une action extérieure. L'aimant agit comme s'il était réduit aux deux pôles extrêmes.

652. Lois des actions magnétiques ou lois de Coulomb. — On ne peut mettre en présence deux pôles isolés, distincts. Toutefois, avec deux longues tiges d'acier aimantées, ayant deux extrémités très voisines et les deux autres éloignées, Coulomb a pu ne tenir compte que de l'action des deux pôles voisins; il a constaté que l'action mutuelle de deux pôles varie *en raison inverse du carré de leur distance.*

La quantité de magnétisme ou la masse magnétique d'un pôle est une *grandeur mesurable.*

Deux pôles d'aimant, agissant successivement sur un même pôle, à la même distance, sont dits renfermer des *masses magnétiques* égales *s'ils exercent une même action.* On appelle masse magnétique *double* ou *triple* la masse magnétique d'un pôle qui exerce une action double ou triple. L'action étant, *par définition,* proportionnelle aux masses magnétiques, l'action mutuelle de deux masses μ et μ' distantes de d, est

$$F = K \frac{\mu\mu'}{d^2};$$

F est exprimé en dynes, d en centimètres.

Unité de magnétisme. — On prend pour *unité de magnétisme* une quantité qui exercerait, *dans l'air*, sur une quantité égale placée à un centimètre de distance, une force égale à une dyne; alors, dans la relation $F = K \frac{\mu\mu'}{d^2}$, on a $K = 1$, si μ et μ' sont exprimés en unités de magnétisme.

Des masses magnétiques s'ajoutent. L'action sur un pôle de deux pôles réunis μ et μ', est proportionnelle à leur somme $\mu + \mu'$ s'ils sont de même nom, et à leur différence $\mu - \mu'$ s'ils sont de noms contraires.

Supposons un pôle nord et un pôle sud exerçant séparément, à la même distance, une même action sur un même pôle; comme leur action devient nulle si on les réunit, on attribue les signes + et — aux masses magnétiques nord et sud. On convient de donner le signe + aux masses magnétiques nord. Entre deux masses de même signe, la force est répulsive, et F est positif; F est négatif pour une attraction.

AIMANTATION PAR INFLUENCE

653. Champ magnétique. — On appelle *champ magnétique* un espace dans lequel se manifestent des actions magnétiques.

Un champ magnétique est caractérisé en chacun de ses points par l'*intensité* et la *direction* de la force magnétique exercée en ce point sur une masse magnétique + 1. Cette force s'exprime en *gauss;* l'unité d'intensité magnétique ou le *gauss* est une force qui exerce une action égale à une dyne sur une masse magnétique + 1.

Aimantation par influence. — Une substance magnétique placée dans un champ magnétique *devient un aimant* (fig. 761). Ainsi un morceau de fer pur ou *fer doux ab,* placé à une petite distance d'un aimant AB et sur son prolongement, attire *immédia-*

tement la limaille à ses extrémités en formant des houppes où les grains s'aimantent par influence et attirent d'autres grains. L'action d'une aiguille aimantée fait voir que les pôles en regard *b* et A sont de noms contraires.

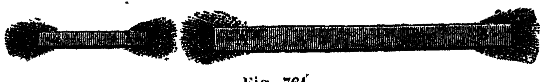


Fig. 761.

En appelant *axe magnétique* d'un aimant la ligne droite qui passe par ses deux pôles et en attribuant à cet axe *un sens* à l'intérieur de l'aimant, par exemple du pôle sud au pôle nord, l'axe magnétique de l'aimant *ab* prend la même direction et le même sens que l'axe magnétique de l'aimant AB. Le fer doux *ab* agit sur un autre fer doux placé à sa suite qui s'aimante dans le même sens, mais moins fortement. L'aimantation cesse dès qu'on éloigne l'aimant AB; le magnétisme de *ab* n'a été que temporaire.

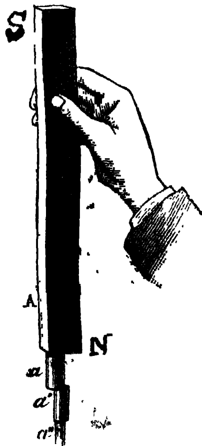
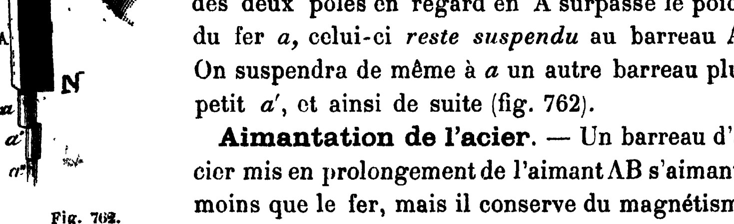


Fig. 762.

L'attraction d'une substance magnétique par un aimant, ne s'exerce en réalité qu'entre deux aimants puisque la substance magnétique est aimantée par influence au moment de son attraction.



L'aimantation par influence d'un barreau *a* augmente quand la distance diminue, et, si l'attraction des deux pôles en regard en A surpasse le poids du fer *a*, celui-ci *reste suspendu* au barreau A. On suspendra de même à *a* un autre barreau plus petit *a'*, et ainsi de suite (fig. 762).

Aimantation de l'acier. — Un barreau d'acier mis en prolongement de l'aimant AB s'aimante moins que le fer, mais il conserve du magnétisme après que l'influence a cessé.

Force coercitive. — Les variations dans le degré d'aimantation sont attribuées à une résistance des molécules à l'orientation, dite *force coercitive*. Très faible dans le fer doux, elle devient importante dans le fer combiné avec certains corps. La force coercitive d'un acier (fer et carbone) est maximum lorsque, après avoir été chauffé au rouge, il est *trempé* par un refroidissement brusque.

MÉTHODES D'AIMANTATION

654. Les aimants industriels sont en acier trempé. Un barreau d'acier l'aimante par influence dans un champ magnétique, son axe

magnétique est parallèle à la force du champ magnétique. L'aimantation permanente est accrue si, pendant l'influence, le barreau subit des chocs, des vibrations, des *frictions*. Les méthodes d'aimantation par les aimants sont des méthodes de friction.

Aimantation par simple touche (fig. 763). — La simple touche consiste à frotter un barreau d'acier A'B' avec un pôle d'aimant B (par exemple un pôle sud) d'une extrémité à l'autre, *toujours dans le même sens*. Ce pôle sud détermine un pôle nord à l'extrémité qu'il quitte après chaque friction.

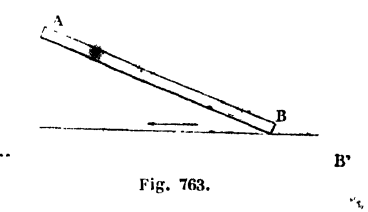


Fig. 763.

Aimantation par touche séparée (fig. 764). — Au milieu du barreau à aimanter on applique les pôles opposés de deux barreaux et on les écarte *simultanément*, l'un dans un sens, l'autre en sens contraire, jusqu'aux extrémités; là, on enlève les deux barreaux, on les reporte au milieu et on les écarte de nouveau en effectuant toujours pour chacun d'eux le déplacement *dans le même sens*. Un pôle A développe un pôle contraire à l'extrémité qu'il quitte à la fin de chaque friction (1).

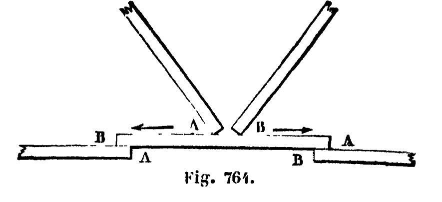


Fig. 764.

Aimantation par les courants. — Les courants électriques produisent des champs magnétiques et peuvent former des aimants réguliers et puissants. C'est le procédé d'aimantation le plus commode et le plus usuel.

Aimantation maximum et aimantation permanente. — Des frictions avec de forts aimants donnent à un barreau d'acier son aimantation *maximum*. Quand le maximum est atteint, on dit que l'aimant est *saturé*. Après l'aimantation, le magnétisme du barreau diminue progressivement jusqu'à un état permanent. Un acier fortement trempé conserve une fraction importante de son aimantation maximum. *Après l'aimantation,* les vibrations, les chocs diminuent le magnétisme des aimants.

Variations de l'aimantation avec la température. — L'aimanta-

---

(1) Les aimants mobiles sont inclinés d'environ 30° sur le barreau à aimanter, et on augmente leur effet en faisant reposer pendant l'aimantation les extrémités du barreau à aimanter sur des pôles fixes respectivement contraires à ceux qu'on va développer.

tion d'un aimant diminue quand la température s'élève, mais reprend sa valeur par le refroidissement. Cependant, à une température très élevée, un aimant perd toute son aimantation.

Au rouge, le fer doux cesse aussi d'être attiré par un aimant.

DIAMAGNÉTISME

655. Substances magnétiques et diamagnétiques. — Tous les corps subissent l'action d'aimants *puissants*. Certains corps, comme le fer, sont attirés et dits *magnétiques*, d'autres, comme le bismuth, sont repoussés et dits *diamagnétiques*.

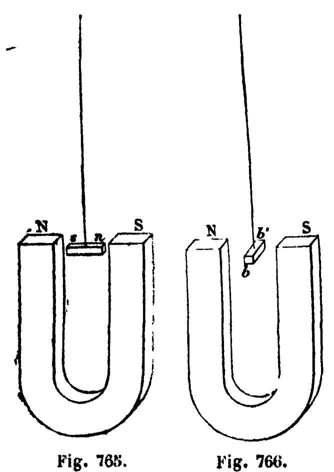


Fig. 765. Fig. 766.

Un pôle d'aimant attire une boule de fer parce qu'il y fait naître deux pôles ; un pôle de nom contraire apparaît à la partie la plus voisine. Une balle de bismuth est repoussée par un pôle d'aimant, comme si ce pôle faisait naître, dans la partie voisine du bismuth, un pôle de même nom qu'il repousse.

Les corps magnétiques et diamagnétiques se distinguent par un autre caractère. Un petit barreau ***magnétique*** suspendu horizontalement en son milieu entre les deux pôles d'un fort aimant en fer à cheval prend la ***direction de la ligne des pôles*** (fig. 765) ; chaque pôle de l'aimant fait en effet naître dans la partie voisine du barreau un pôle de nom contraire, et l'attraction de N sur *s* et de S sur *n*, explique la déviation axiale. Un petit barreau de ***bismuth***, suspendu de même, s'oriente ***perpendiculairement à la ligne des pôles*** (fig. 766), car, lorsque le bismuth s'écarte de cette direction, le pôle dont il s'approche fait naître dans la partie voisine du bismuth un pôle de même nom qu'il repousse.

Pour les corps diamagnétiques et pour les corps faiblement magnétiques, l'action d'un aimant cesse après l'influence, ils ne prennent que du magnétisme induit, sans magnétisme résiduel.

MAGNÉTISME TERRESTRE

656. L'action de la Terre sur un aimant est seulement directrice. — Un barreau non magnétique, suspendu par son centre de gravité, reste en équilibre dans toutes les positions qu'on lui donne, car son poids est annulé par la résistance du point

de suspension. Un barreau aimanté, suspendu par son centre de gravité *s'oriente;* il est donc soumis à d'autres forces que son poids. Ces forces sont attribuées à une action magnétique de la Terre.

D'après un théorème de mécanique (**27**), les forces qui agissent sur un corps peuvent toujours être remplacées par un *couple* et une *force*. Ici, *le couple existe seul;* la force isolée est nulle; elle n'a, en effet, ni composante horizontale, ni composante verticale.

La force isolée n'a pas de composante verticale. — Un barreau d'acier, placé sur l'un des plateaux d'une balance, fait équilibre à une même tare, *avant* et *après* son aimantation.

La force isolée n'a pas de composante horizontale. — Un barreau aimanté NS, posé sur un disque de liège qui flotte sur l'eau, *s'oriente* (fig. 767), mais *il ne subit pas de translation,* comme cela aurait lieu si une force horizontale agissait constamment sur l'aiguille.

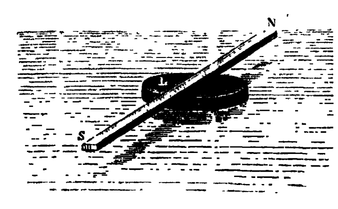


Fig. 767.

Couple directeur. — Un barreau aimanté, librement suspendu par son centre de gravité, est soumis à une action qui est directrice comme l'est l'action d'un *couple*. Le barreau est en équilibre lorsque les deux forces parallèles et opposées du couple sont en prolongement l'une de l'autre (1).

On précise la signification du mot pôle en appelant *pôles* les points d'application des forces du couple terrestre. L'*axe magnétique* est la ligne des deux pôles; il prend la direction des forces du couple si l'aimant est suspendu par son centre de gravité.

657. Égalité des masses magnétiques nord et sud dans un aimant. Position des pôles. — L'action terrestre paraît provenir de *centres magnétiques éloignés.*

Un centre magnétique éloigné n'exerce sur les masses magnétiques nord d'un barreau que des actions parallèles, proportionnelles aux masses (**652**), et représentées par $f = Tm$, $f' = Tm'$... La résultante de ces forces leur est parallèle, égale à $f + f' + f''$... ou $T\Sigma m$, et appliquée en un point N, *centre des forces parallèles* (**22**) (fig. 768). Ce point est fixe, car dans un déplacement de l'aimant, les forces parallèles ne changent ni de grandeur ni de point d'application. Ce point N est le **pôle nord** (2).

De même, les forces parallèles appliquées aux masses sud ont une ré-

(1) En raison du mode de suspension des plateaux d'une balance (**95**) les deux composantes verticales du couple n'ont pas d'effet parce qu'elles sont égales et contaires; une force isolée aurait pu seule donner une composante verticale.

(2) Un pôle joue le même rôle qu'un centre de gravité.

sultante égale à leur somme $T\Sigma m_1$ et cette résultante est appliquée en un point S qui est le **pôle sud**. Les deux résultantes en N et en S étant *égales* puisqu'elles forment un couple, $\Sigma m = \Sigma m_1$. De ce que l'action de la Terre sur un aimant se réduit à un couple, il résulte que, dans un aimant, il y a autant de magnétisme nord que de magnétisme sud.

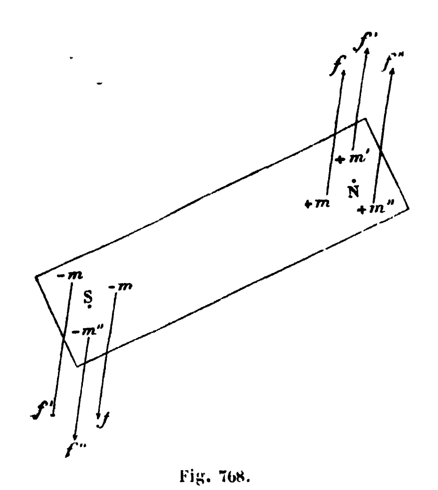


Fig. 768.

En attribuant les signes + et — aux masses nord et sud d'un aimant, on dit que, dans un aimant, la *somme des masses magnétiques est nulle.*

Si, comme un aimant, la Terre présente un deuxième centre magnétique, les directions des deux résultantes, dues à ce deuxième centre *éloigné*. sont parallèles entre elles, et, comme les points d'application de ces forces ne dépendent pas de leur direction, elles sont appliquées aux mêmes points N et S. En composant d'une part les deux résultantes appliquées en N, et d'autre part les deux résultantes, respectivement égales et parallèles, appliquées en S, on a en définitive deux forces égales et parallèles appliquées aux pôles et formant encore un couple.

Par rapport à des centres éloignés, un aimant se comporte comme deux masses magnétiques égales chacune à Σm, l'une de magnétisme nord, en son pôle nord, l'autre de magnétisme sud, en son pôle sud (1).

Méridien magnétique. — En un lieu, on appelle **méridien magnétique**, l'intersection avec la surface terrestre du *plan vertical qui passe par l'axe magnétique* d'un aimant librement suspendu.

La direction de l'axe magnétique d'un aimant librement suspendu est la direction de la force magnétique terrestre. On détermine cette direction en mesurant deux angles : l'inclinaison et la déclinaison.

658. Inclinaison. — Un aimant, librement suspendu par son centre de gravité, s'oriente dans le plan du méridien magnétique, mais ne se tient pas horizontal. Dans nos régions, sa partie *nord plonge au-dessous de l'horizon.* On appelle *inclinaison,* en un lieu déterminé, *l'angle de la direction nord de l'axe magnétique d'un aimant avec une horizontale menée dans la partie nord du mé-*

(1) La définition des pôles n'est précise que s'il s'agit d'actions exercées sur un aimant par des masses magnétiques *éloignées*. Les actions d'une masse magnétique voisine M ont deux résultantes, appliquées en des points dont la position varie avec la position de la masse M.

ridien magnétique. Cet angle peut varier de $+ 90^\circ$ à $- 90^\circ$. Habituellement on *équilibre* l'aimant, c'est-à-dire qu'on ramène l'axe magnétique à l'horizontalité par un contrepoids appliqué à une distance convenable du point de suspension.

659. Déclinaison. — On appelle *déclinaison,* en un lieu déterminé, *l'angle de la partie nord de l'axe magnétique d'un aimant horizontal avec la partie nord du méridien géographique* (1). Cet angle peut varier de 0° à 180°.

Cet angle plan mesure *l'angle dièdre de la partie nord du* plan du *méridien magnétique et de la partie nord du* plan du *méridien géographique.*

660. Décomposition de la force magnétique terrestre (fig. 769). — Soit N le pôle nord d'un aimant librement suspendu, et soit F la force NF du couple terrestre qui agit sur ce pôle.

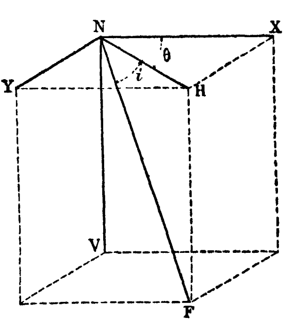


Fig. 769.

Le plan vertical VNF mené par la force F est le plan du *méridien magnétique;* l'horizontale NH tracée dans ce plan est la composante horizontale de la force F dans le plan du méridien magnétique; la verticale NV est sa composante verticale; l'angle HNF est l'angle i d'inclinaison.

$$NH = NF \cos i, \quad NV = NF \sin i.$$

Dans le plan horizontal qui passe par N, décomposons NH en deux NX et NY rectangulaires entre elles; θ désignant l'angle HNX,

$$NX = NH \cos \theta, \quad NY = NH \sin \theta.$$

La force NF est ainsi décomposée en trois composantes rectangulaires entre elles NV, NX et NY.

$$NV = NF \sin i; \quad NX = NF \cos i \cos \theta; \quad NY = NF \cos i \sin \theta.$$

I. Figurons l'aimant dans le plan du méridien magnétique (fig. 770). 1° Si l'aimant est complètement libre, son axe se dirige suivant NF.

2° Si l'aimant est mobile horizontalement, comme une aiguille de déclinaison, il est en équilibre quand son axe prend la direction NH.

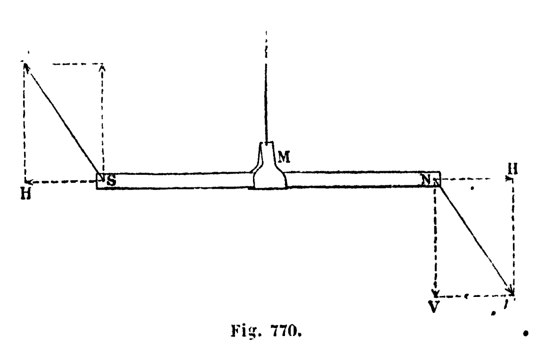


Fig. 770.

(1) Les *pôles géographiques* sont les deux points de la surface du globe que rencontre l'axe terrestre, c'est-à-dire la ligne autour de laquelle la Terre exécute sa rotation diurne. Le *méridien géographique* ou astronomique d'un lieu est l'intersection avec la surface terrestre d'un plan passant par la verticale du lieu et l'axe terrestre; le Soleil moyen traverse le plan du méridien à midi.

II. Si l'aimant tourne autour d'un axe horizontal et n'est mobile que dans un plan vertical, son axe se dirige suivant NF lorsque ce plan est le plan du méridien magnétique (fig. 770). Dans le cas où le plan vertical fait un angle θ avec le méridien magnétique, NY étant une composante dirigée suivant l'axe de rotation, le pôle N est soumis seulement à l'action des composantes NX et NV, et l'aimant prend la direction de leur résultante R (fig. 771). Désignons par i' l'angle RNX

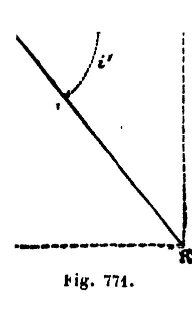


Fig. 771.

$$\operatorname{tg} i' = \frac{NV}{NX} = \frac{NF \sin i}{NF \cos i \cos \theta} = \frac{\operatorname{tg} i}{\cos \theta}$$

Quand $\theta = 90^0$ $i' = 90^0$. L'aimant se tient donc vertical quand il est mobile dans un plan perpendiculaire au plan du méridien magnétique.

III. Un aimant *soutenu par son centre de gravité* et mobile *autour d'un axe parallèle à la force magnétique* terrestre, est soustrait à la fois aux actions de la pesanteur et du magnétisme. Il reste en équilibre indifférent dans toutes les positions.

661. Mesure de la déclinaison. — Pour mesurer la déclinaison, on fait usage d'une aiguille aimantée *équilibrée,* mobile dans un plan horizontal ; son axe de figure se meut en regard d'une circonférence divisée sur laquelle est marquée la trace du méridien géographique.

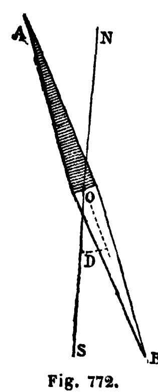


Fig. 772.

Si la ligne des pointes AB coïncidait avec la direction de la parallèle à la ligne des pôles menée par le point de suspension, l'angle D de la ligne des pointes et de la trace NS du plan du méridien astronomique serait la déclinaison (fig. 772).

Méthode du retournement. — Habituellement, la ligne des pointes OA et la parallèle OH à la ligne des pôles font entre elles un petit angle. On *lit d'abord l'angle* AON (fig. 773).

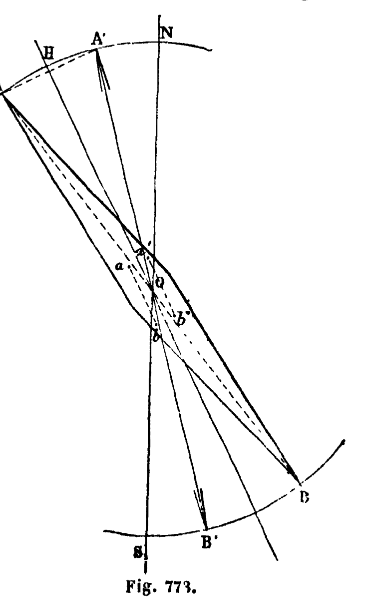


Fig. 773.

On retourne ensuite l'aiguille en plaçant au dessus la face qui était au dessous ; la ligne des pôles *ab reprend sa direction* et vient en $a'b'$, à la même distance du point O et dans une position symétrique de *ab;* tous les points de l'aiguille prennent des positions symétriques des précédentes par rapport à la droite OH, menée parallèlement à *ab* par le point O; en particulier, la ligne OA passe en OA' et fait le

même angle que précédemment avec OH. On *lit actuellement* A'ON.

L'angle cherché est $HON = \frac{AON + A'ON}{2}$.

662. Mesure de l'inclinaison. — On fait usage d'une aiguille aimantée mobile, dans un plan vertical VV', autour d'un axe *qui passe par son centre de gravité*, elle est ainsi soustraite à l'action de la pesanteur (fig. 774).

L'aiguille se meut en regard d'un cercle vertical divisé. Ce cercle peut tourner autour d'un axe vertical dont le prolongement passe par le centre d'un second cercle divisé HH' rendu horizontal par trois vis calantes.

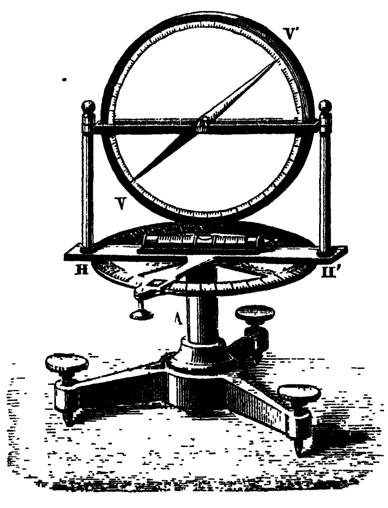


Fig. 774.

Si l'on connaît la déclinaison et le méridien géographique du lieu, on oriente le cercle vertical dans un plan faisant avec le méridien géographique l'angle de déclinaison; l'aiguille est alors mobile dans le méridien magnétique, et son axe magnétique se place dans la direction de la force magnétique terrestre. L'angle de la ligne des pointes avec l'horizontale est lu sur le cercle vertical; on *retourne* l'aiguille de manière que la face antérieure de l'aiguille passe en arrière, on lit le nouvel angle de la ligne des pointes avec l'horizontale : la moyenne des deux angles est l'inclinaison.

Recherche du méridien magnétique. — Quand le plan d'oscillation de l'aiguille est perpendiculaire au méridien magnétique, l'axe de rotation est dirigé suivant la composante horizontale de la force magnétique. La composante verticale étant alors seule efficace, l'aiguille se tient verticalement (**660**). D'après cela, si l'on oriente le cadre d'oscillation de façon que l'aiguille soit verticale, une rotation du cadre de 90° le fait coïncider avec le méridien magnétique.

663. Boussoles. — Les boussoles sont des instruments qui permettent de *déterminer la direction nord-sud* géographique et servent *d'indicateurs de route*. L'usage d'une boussole suppose la connaissance de la déclinaison au lieu où on l'emploie.

Dans la **boussole d'arpenteur** (fig. 775), une aiguille, *équilibrée*, est *mobile dans un plan rendu horizontal* avec un niveau à bulle d'air. La ligne des pointes *ab*, se meut en regard d'une circonférence divisée. Cette ligne coïncide sensiblement avec l'axe magnétique de l'aiguille ; on dirige la division 0 — 180 ou NS de la graduation de telle façon que l'angle *a*ON de la partie nord de la ligne des pointes

et de la partie nord de la ligne NS soit de 15°, à gauche de N, si l'angle de déclinaison au lieu considéré est de 15° à l'ouest.

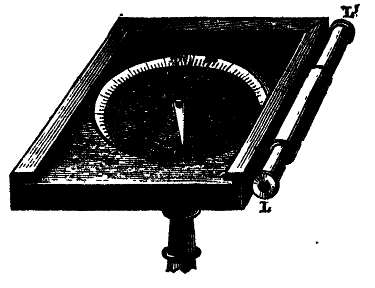


Fig. 775.

Le long de l'un des bords de la boîte et, parallèlement à la droite NS, est fixée une lunette viseur LL'. L'opération précédente a dirigé l'axe du viseur vers le nord.

Boussole marine ou *compas*. — Une aiguille aimantée est assujettie sur un disque de mica divisé en degrés et reposant sur un pivot; la ligne des pointes de l'aiguille coïncide avec la ligne 0 — 180 du disque. Par une suspension à la Cardan, le pivot reste vertical malgré les oscillations du navire; il occupe le centre d'une boîte sur la paroi de laquelle est marquée une ligne fixe, *la ligne de foi*, dirigée suivant l'axe du navire.

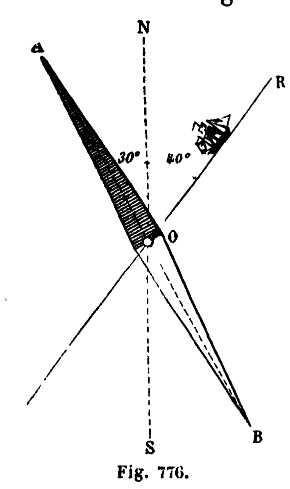


Fig. 776.

Si la route à suivre, de direction OR, tracée sur la carte géographique (fig. 776), fait un angle de 40° à l'est avec la ligne nord-sud NS, et si la déclinaison, au lieu où l'on se trouve, est, d'après la carte magnétique, de 30° à l'ouest, le gouvernail doit être manœuvré de façon que la direction nord de la ligne de foi fasse un angle de 70° avec l'extrémité nord OA de l'aiguille (1).

664. Variations de la déclinaison et de l'inclinaison. — 1° **Aux différents lieux du globe.** — On se représente, d'une façon approchée, les variations de la déclinaison et de l'inclinaison en imaginant, à l'intérieur du globe, un axe magnétique AB peu incliné sur l'axe géographique NS et en traçant sur la sphère terrestre, des méridiens et des parallèles par rapport à cet axe (fig. 777).

La **déclinaison** en un point P est l'angle *a*P*c* du méridien magnétique ABP et du méridien géographique NSP. Un *méridien magnétique* est une ligne d'égale déclinaison. La déclinaison est nulle dans le méridien NBS *qui contient à la fois l'axe magnétique* AB *et l'axe géographique* NS; l'aiguille aimantée s'y dirige du nord au sud. En Europe, *la déclinaison est occidentale;* la partie nord du méridien magnétique s'y trouve à

(1) Le lieu ou *point* où l'on se trouve est déterminé chaque jour par un officier chargé de *faire le point*.

l'ouest de la partie nord du méridien géographique; de l'autre côté du grand cercle de déclinaison nulle, par exemple en Chine, la déclinaison est orientale.

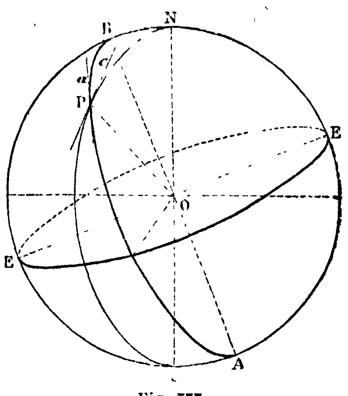


Fig. 777.

Les *parallèles magnétiques* sont les lignes d'égale **inclinaison**. L'*équateur magnétique* EOE' réunit les points d'inclinaison nulle, où une aiguille aimantée soutenue par son centre de gravité se tient horizontale; l'inclinaison est de 90° aux *pôles magnétiques* A et B, peu éloignés des pôles géographiques : l'aiguille aimantée s'y tient verticale. De l'équateur magnétique aux pôles magnétiques, l'inclinaison croît de 0° à 90°. Au nord de l'équateur magnétique, un pôle nord plonge au-dessous de l'horizon ; au sud de cet équateur c'est le pôle sud qui plonge.

2° **En un lieu déterminé**. — En un lieu déterminé, outre de petites variations diurnes et *accidentelles* (1), il y a des variations *séculaires*, consistant en une oscillation lente du méridien de déclinaison nulle.

La **déclinaison** était orientale à Paris à la fin du XVIe siècle ; nulle vers le milieu du XVIIe, elle devint ensuite occidentale, atteignit un maximum vers 1815 avec 24°; elle est encore *occidentale* et diminue.

L'inclinaison était de 75° à Paris en 1671; depuis, elle diminue (2).

665. Intensité de la force magnétique terrestre. — L'intensité magnétique T en un point du globe est la force qui agit en ce point sur l'unité de magnétisme, elle s'exprime en *gauss*.

Désignons par H la composante horizontale de l'intensité, par i l'inclinaison, $H = T \cos i$. La valeur de H à Paris est 0,198. Le pôle d'une aiguille aimantée, d'unité de masse magnétique, est sollicité à Paris par une force T, égale à $\frac{0,198}{\cos 64^0}$, ou 0,466 dynes.

Oscillations d'un barreau aimanté. — Une aiguille aimantée écartée de sa position d'équilibre y revient par une série d'oscillations. Lorsque l'angle d'écart est petit, les oscillations sont *isochrones*.

Une aiguille de déclinaison, mobile autour d'un axe vertical qui se projette en O, est soumise à deux forces H, égales et parallèles, appliquées à ses deux pôles (fig. 778). Le couple de ces deux forces peut être remplacé par un couple de même moment (**26**), situé

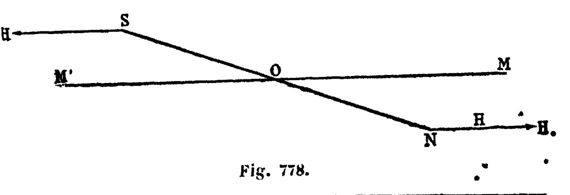


Fig. 778.

(1) Aurores boréales, orages magnétiques.

(2) La déclinaison à Paris était de 13°44′ le 1er janvier 1913, l'inclinaison de 64°.

dans le même plan, ayant un bras de levier moitié moindre et une force double 2H; l'une des forces étant appliquée en N et l'autre en O (fig. 779). La force appliquée en O est sans effet (1), l'autre force agit seule sur le barreau pour le ramener dans le méridien magnétique. Cette dernière force, égale au double de la *composante horizontale* H *de la force du couple terrestre*, constante en grandeur et en direction, donne au barreau aimanté, écarté du méridien magnétique, un mouvement oscillatoire semblable à celui d'un pendule pesant écarté de la verticale.

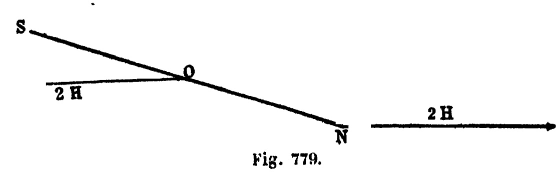


Fig. 779.

La durée de l'oscillation d'un aimant horizontal qui oscille autour d'un axe vertical varie donc en raison inverse de la racine carrée de la composante horizontale terrestre. Appelons H et H′ cette composante en deux lieux différents, t et t' les durées de l'oscillation :

$$\frac{t^2}{t'^2} = \frac{H'}{H}.$$

666. Moment magnétique d'un aimant. — On appelle ***moment magnétique*** d'un aimant le produit μL de la masse magnétique μ de chacun de ses pôles par la distance L qui les sépare.

Dans un champ magnétique uniforme, tel que le champ magnétique terrestre, le moment du couple exercé sur un aimant, mobile horizontalement dans un plan autour d'un axe vertical, est $L\mu H$ lorsque l'axe magnétique de l'aimant est perpendiculaire à la force magnétique; en effet, la force qui s'exerce sur chacun des pôles est μH, et la distance des deux forces est L.

Intensité d'aimantation. — Pour un aimant prismatique ou cylindrique de longueur l, de section s et de volume v, qui a pour pôles les deux bases du prisme ou du cylindre, le moment magnétique est $\mathcal{M} = \mu l$, μ étant la masse magnétique de chacun des pôles. L'intensité d'aimantation A est le moment magnétique par unité de volume : $A = \frac{\mathcal{M}}{v} = \frac{\mu l}{ls} = \frac{\mu}{s} = \sigma$, c'est la densité magnétique σ en chacun des pôles.

On appelle ***feuillet magnétique*** une lame aimantée transversalement, formée d'aimants parallèles dont les axes magnétiques sont perpendiculaires aux faces de la lame; les pôles de même nom occupent respectivement une face de la lame. Pour un feuillet, le moment

(1) Cette force ne pourrait que dévier le barreau de la verticale; or, elle est très faible par rapport au poids du barreau.

magnétique par cm² est $\sigma\varepsilon$; σ est la densité magnétique sur la lame, ε est l'épaisseur de la lame.

FLUX MAGNÉTIQUE

667. Lignes de force. — En un point d'un champ magnétique, la force qui s'exerce sur une masse magnétique $+ 1$, a une intensité de H gauss. La trajectoire suivie par la masse $+ 1$, supposée libre, est appelée ligne de force. La tangente en chaque point d'une ligne de force est la direction de la force en ce point.

Cette trajectoire peut être pratiquement déterminée. La direction de la force en un point P est, en effet, la direction d'une aiguille aimantée *très courte,* suspendue par son centre de gravité, pour être soustraite à l'action de la pesanteur. Des forces magnétiques égales et contraires sont appliquées aux deux pôles de l'aiguille et *son axe magnétique prend* **la direction de la force.**

Soit un champ magnétique dû à un aimant droit (fig. 780). Chacun des pôles d'une petite aiguille aimantée, supposée en P, est soumis à deux actions f et f' exercées par les pôles N et S de l'aimant; la résultante est F. Les résultantes F ont la même valeur et la même direction aux deux pôles de l'aiguille qui est très courte, mais leurs sens sont opposés. Leur couple dirige l'axe magnétique de l'aiguille suivant la force PF.

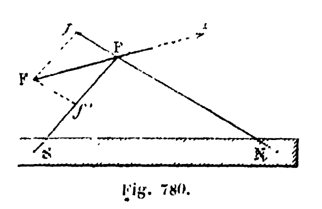


Fig. 780.

668. Spectres magnétiques. — Les spectres magnétiques révèlent matériellement l'existence et la direction des lignes de force d'un champ magnétique.

On pose, sur un aimant, une feuille de carton lisse sur laquelle on sème, avec un tamis, de la fine limaille de fer.

Chaque particule de limaille devient par influence un aimant à pôles très rapprochés sur lesquels agissent les deux forces d'un couple. Si l'on fait sauter les grains par de petites secousses imprimées à la feuille de carton, l'*axe magnétique* d'une particule, qui est sa plus grande dimension, s'*oriente suivant la ligne de force.* Les particules aimantées s'attirent par leurs pôles contraires et s'alignent en

chaînes continues qui forment les courbes d'un spectre magnétique.

Deux lignes de force ne peuvent se couper; car, en un point, un petit aimant libre, n'a qu'une position d'équilibre stable.

Exemples de spectres magnétiques. — *Aimant droit.* — Dans un plan passant par les deux pôles, les lignes de force *partent d'une extrémité* de l'aimant, s'épanouissent dans diverses directions (fig. 781), et *retournent à l'autre pôle.*

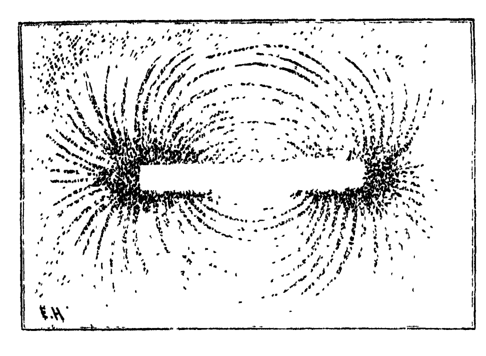


Fig. 781.

Pôle d'un aimant. — En saupoudrant de limaille de fer un carton appliqué normalement à l'axe magnétique sur le pôle d'un aimant droit, les lignes de force *rayonnent* en tous sens autour du pôle.

Aimant en fer à cheval. — Les chaînes de limailles vont d'un pôle à l'autre (fig. 782); plus les pôles sont rapprochés, plus les lignes de force sont resserrées entre ces pôles.

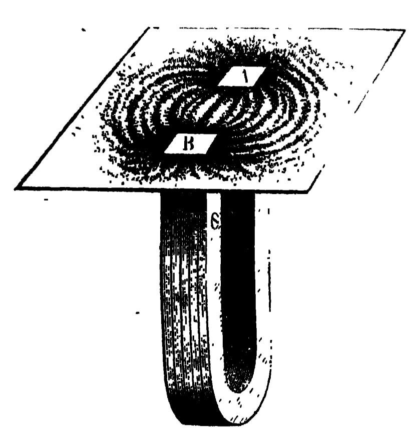


Fig. 782.

669. Flux de force magnétique. — On adopte pour **sens** des lignes de force, à *l'extérieur* d'un aimant, le sens *du pôle nord au pôle sud.* On admet que toutes les courbes *se ferment* en se continuant *à l'intérieur* de l'aimant, du *pôle sud au pôle nord* (1); les lignes extérieures passant toutes à l'intérieur, c'est à l'intérieur qu'elles sont le plus serrées. Les courbes des lignes de force parcourent ainsi un *circuit magnétique* dans l'aimant et dans l'espace environnant.

On représente une force magnétique de H gauss exercée *en un*

(1) Le sens à l'intérieur de l'aimant du *pôle sud au pôle nord*, suppose les particules de la substance magnétique orientées par l'aimantation, comme si l'enchaînement observé dans le champ magnétique extérieur se continuait à l'intérieur de l'aimant.

point sur une masse magnétique + 1, par un nombre de lignes de force égal à H, traversant un cm² perpendiculaire à la direction de la force. Une surface S, perpendiculaire à la direction de la force, est ainsi traversée par un *flux de force* HS.

Flux de force d'un pôle magnétique. — H étant la force exercée par une masse magnétique m, à la distance r, sur une masse magnétique +1, $4\pi r^2H$ est le flux de force qui traverse une surface sphérique de rayon r et de centre m. Comme, d'après la loi de Coulomb, $H = \frac{m}{r^2}$, on a $4\pi r^2 H = 4\pi m$. Le flux $4\pi m$ traverse toutes les surfaces sphériques qui ont m pour centre. Ce flux diverge du pôle m (fig. 783), si m a un magnétisme nord; il converge vers m, si m a un magnétisme sud.

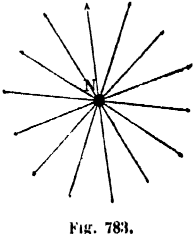


Fig. 783.

Le flux magnétique peut atteindre 15000 par centimètre carré de section.

Dans un champ uniforme à l'intérieur d'un électro-aimant, le flux est, comme la force, constant en grandeur et en direction. Les lignes du flux sont des droites parallèles équidistantes. La valeur du flux est HS; l'intensité H de la force est exprimée en gauss, la surface S, normale à la direction de la force, est exprimée en cm².

Le champ magnétique terrestre est uniforme dans un espace restreint, où il n'y a ni fer ni acier.

Si la normale à une surface S, traversée par un flux de force, fait un angle α avec la direction de la force magnétique, le flux qui traverse la surface est HS cos α. Le flux est nul si $H = 0$, ou si $\alpha = 90^0$.

669. Propriétés des lignes de force magnétique. —

L'interprétation des phénomènes d'influence magnétique est facilitée en attribuant au flux de force des propriétés particulières :

1° Il *circule sans perte*, quels que soient les milieux qu'il rencontre. 2° Il choisit *la route la plus courte* ou celle qui lui offre le moins de résistance. Ce sont les substances magnétiques qui offrent le moins de résistance et particulièrement le fer.

Distribution des lignes de force dans l'influence magnétique. — Les lignes de force sont modifiées dans leur distribution par l'introduction d'une substance magnétique dans un champ magnétique.



Fig. 784.

1° Approchons *un barreau de fer doux d'un pôle d'un aimant droit* (fig. 784). Le fer offrant au flux un

passage plus facile que l'air, les lignes de force, au lieu de s'épanouir en sortant du pôle nord de l'aimant, convergent vers le fer doux et l'aimantent de façon à entrer par son pôle sud pour sortir par son pôle nord.

2° Approchons *un barreau de fer doux des pôles d'un aimant en fer à cheval*, la plupart des lignes de force passent dans le fer doux C qui s'aimante et s'applique sur les pôles. Il prend alors le nom de **contact** (fig. 785).

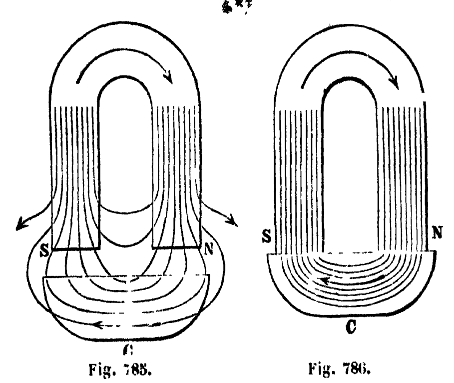


Fig. 785. Fig. 786.

3° Disposons *un cylindre creux de fer doux entre les deux pôles contraires d'un aimant* (fig. 787). Les lignes de force qui vont d'un pôle à l'autre, s'inclinent, afin de traverser pour la plupart la masse du cylindre.

Orientation d'une substance magnétique dans un champ magnétique. — Une substance magnétique, *libre de s'orienter*, s'aimante en *dirigeant sa plus grande dimension suivant les lignes de force du champ magnétique*, ce qui diminue le trajet des lignes de force à travers les substances non magnétiques.

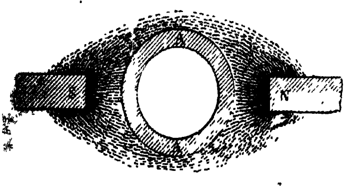


Fig. 787.

1° Ainsi, une particule de limaille d'un spectre magnétique dirige sa plus grande dimension suivant la ligne de force.

2° Un barreau de fer F étant placé entre les pôles d'un aimant en fer à cheval (fig. 788), les lignes de force se déforment pour passer en plus grand nombre par le barreau F; si ce barreau se déplace librement, il se dirige parallèlement aux lignes de force (fig. 789).

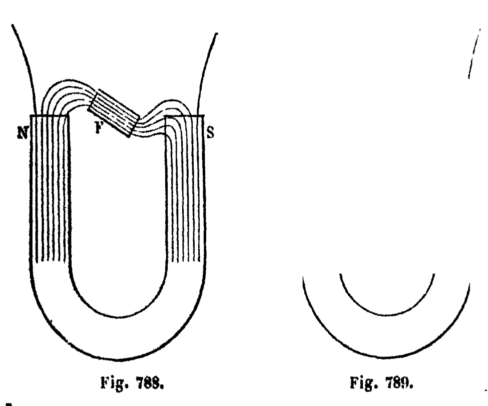


Fig. 788. Fig. 789.

Attractions par raccourcissement des lignes de force. — L'attraction des pôles de noms contraires peut être considérée comme due à une tendance des lignes de force à se raccourcir, pour *diminuer leur trajet* à travers les substances non magnétiques.

1° C'est ainsi que *le pôle sud* d'un barreau de fer doux, aimanté par influence, *est attiré par le pôle nord* de l'aimant en regard (fig. 784).

2° Quand un fer doux est approché des pôles d'un aimant en fer à cheval, les lignes de force tirent, comme des cordons élastiques, sur le fer doux et celui-ci *s'applique sur les pôles* de l'aimant (fig. 786).

670. Circuits magnétiques fermés. — Quand un *contact* est venu adhérer aux pôles d'un aimant en fer à cheval, les lignes de force se ferment dans la substance magnétique, et constituent un *circuit.* Il ne sort plus de ligne de force à l'extérieur si le contact est assez large pour laisser passer toutes les lignes de force de l'aimant (fig. 786).

Dans la cavité d'un cylindre creux de fer placé entre deux pôles contraires (fig. 787), il ne se montre pas de ligne de force si l'épaisseur du cylindre est suffisante; le cylindre devient un **écran magnétique** et une aiguille aimantée, suspendue à l'intérieur, n'éprouve pas d'action de la part d'un aimant extérieur.

Anneau fermé. — Un anneau fermé peut être aimanté de façon à ne pas présenter de pôles et de magnétisme apparent; il n'agit pas sur des masses magnétiques extérieures, toutefois il est parcouru par un flux magnétique qui reste entièrement à l'intérieur; si on le brise, chacun des fragments offre deux pôles.

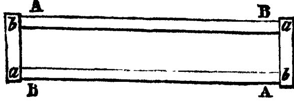


Fig. 790.

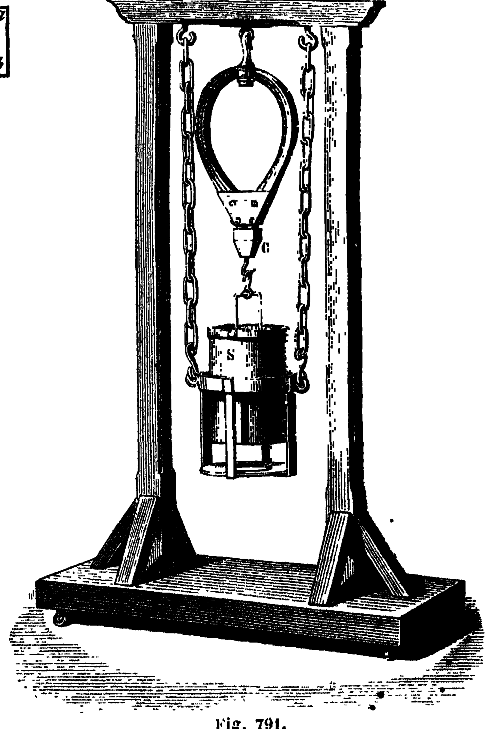


Fig. 791.

Conservation des aimants. — L'aimantation d'un aimant va constamment en s'affaiblissant. Cette *désaimantation* est favorisée par les chocs, les vibrations et les variations brusques de température. La désaimantation n'a pas lieu si aucune ligne de force ne s'échappe à l'extérieur; on réalise à peu près cette condition en disposant parallèlement deux barreaux aimantés AB, les pôles de noms contraires en regard, et en réunissant leurs extrémités par des *contacts* de fer doux *ab* (fig. 790). Les contacts s'aimantent

par influence et ferment le circuit magnétique. Les aimants à grande *force portante* sont des aimants à circuit magnétique fermé par un contact C en fer doux. On mesure la force portante en suspendant au contact un seau S qui contient des poids (fig. 791).

671. Relation entre le flux de force et la position d'équilibre d'un aimant. — Dans un champ magnétique, un aimant s'oriente de telle façon que les lignes de force du champ entrent par le pôle sud et que l'aimant embrasse un flux de force maximum (**742**).

Pour cette raison, l'axe magnétique d'un aimant placé dans un champ magnétique uniforme se dirige dans le prolongement des lignes de force et ces lignes traversent normalement sa section, de son pôle sud à son pôle nord (aiguille de déclinaison).

ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE

---

672. L'électricité dynamique a pour objet le **courant électrique**. Un courant électrique exige une *source d'électricité* qui élève le potentiel d'une charge électrique et lui communique ainsi une *énergie potentielle;* de même, une pompe élève une masse d'eau à un niveau d'où elle peut retomber.

Une **source d'électricité** présente deux *pôles* ou deux conducteurs à des potentiels différents. La réunion des deux pôles ferme un circuit dans lequel se produit un mouvement d'électricité, dit **courant électrique**.

L'élévation du potentiel d'une charge électrique a lieu *aux dépens d'une énergie particulière :* chimique, calorifique ou mécanique (1). Les sources d'électricité se distinguent par la nature de l'énergie dépensée pour entretenir leur fonctionnement.

Le courant électrique est accompagné de manifestations d'énergie. L'électricité dynamique s'occupe des *transformations de l'énergie développée par un courant électrique.*

PILE VOLTAIQUE

La pile est une *source d'électricité qui transforme de l'énergie chimique en énergie électrique.*

673. Élément de Volta. — L'élément de pile de Volta comprend une lame de *zinc* Z et une lame de *cuivre* C plongées dans

---

(1) Les sources d'électricité sont *chimiques* (pile voltaïque), *calorifiques* (pile thermo-électrique), *mécaniques* (machines électrostatiques et machines d'induction).

de l'eau acidulée par de l'acide sulfurique (fig. 792). Deux fils de cuivre fixés, l'un A au cuivre, l'autre B au zinc constituent les deux *pôles*.

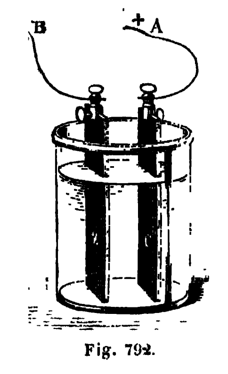


Fig. 792.

Charges électrostatiques aux pôles. — Cet élément posé sur un support isolant, présente à ses deux pôles des *charges électriques de signes contraires*. Il n'apparaît pas d'étincelle quand on rapproche les deux fils jusqu'au contact, car les charges des deux pôles sont excessivement faibles. Elles ne sont pas reconnues directement avec un électroscope ordinaire; on les constate avec un électroscope condensateur (**635**). A cet effet, on réunit, par des fils métalliques isolés, les plateaux de l'électroscope aux deux pôles de l'élément (fig. 793), puis on supprime les communications. En soulevant le plateau supérieur, les feuilles d'or divergent (fig. 794). Le plateau relié au pôle zinc (métal le plus attaqué par l'eau aci-

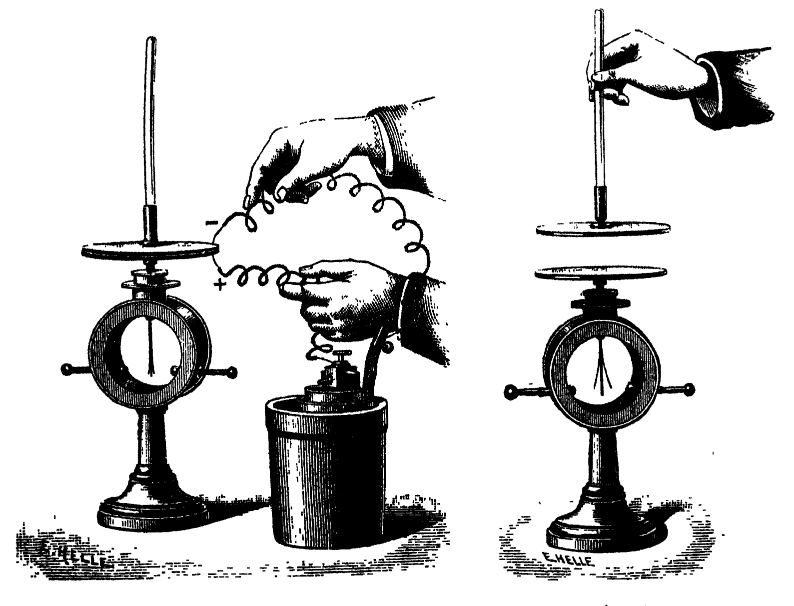


Fig. 793. Fig. 794.

dulée) a une charge négative. Le plateau relié au pôle cuivre a une charge positive. Le pôle zinc est *négatif*, le pôle cuivre est *positif*.

Différence de potentiel aux deux pôles. — *Les deux pôles d'un*

élément de pile se comportent comme deux conducteurs à différence de potentiel constante.

La *différence de potentiel* des deux pôles ne dépend que de la *nature* des lames plongées et du liquide qui les baigne. *Elle ne varie pas avec la grandeur, la forme, la distance des lames.* En outre, *elle ne dépend pas de la charge absolue de l'élément;* ainsi, on ne la modifie pas quand on rend nulle la charge de l'un des pôles en le mettant en communication avec le sol (1).

674. Pile de plusieurs éléments. — On réunit plusieurs éléments en *série*, en reliant le pôle positif d'un élément au pôle négatif de l'élément suivant (fig. 795). Le pôle zinc du premier élément et le pôle cuivre du dernier, laissés libres, forment les *pôles de la pile;* ils ont des potentiels plus élevés que les pôles d'un seul élément.

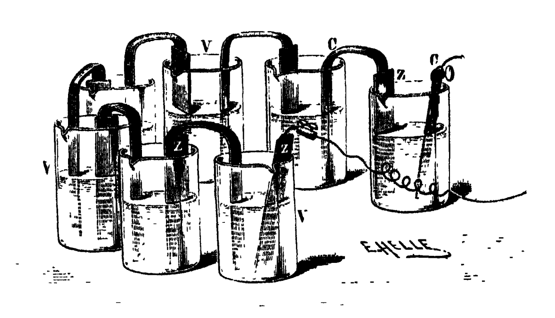


Fig. 795.

Pour une pile de n éléments de même constitution, la différence de potentiel entre les pôles d'un élément étant E, nE est *la différence de potentiel aux deux pôles extrêmes.*

Soit V le potentiel du pôle négatif du premier élément (fig. 796), le potentiel du pôle positif (2) de cet élément est V + E; le pôle négatif du deuxième a le même potentiel V + E, le potentiel du pôle positif de cet élément est V + 2E, puisqu'une différence de potentiel E s'établit entre les deux pôles, quel que soit leur état électrique déjà existant. De même, le potentiel du pôle positif du troisième élément sera V + 3E..., le potentiel du pôle positif du n^e élément est V + nE = V'.

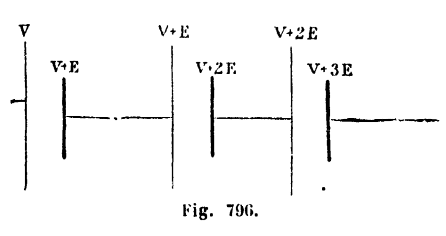


Fig. 796.

La différence de potentiel aux deux pôles d'une pile est V' — V = nE ou la somme des différences aux pôles des éléments constituants.

(1) En électrisant l'élément, on peut donner le même signe aux charges des deux pôles sans que la différence de potentiel change.

(2) On convient de figurer un élément par 2 traits parallèles, le pôle positif est représenté par une ligne courte et grosse, le pôle négatif par une ligne longue et fine.

La *valeur absolue* du potentiel à chacun des deux pôles d'une pile change avec le mode d'isolement de la pile (1).

Si le pôle négatif d'une pile est relié au sol et prend ainsi le potentiel zéro, le pôle positif a le potentiel nE. Un conducteur de capacité C relié à ce pôle prend une charge nCE; cette charge peut devenir importante avec une pile d'un grand nombre d'éléments.

675. Courant électrique. — Quant on réunit les deux pôles

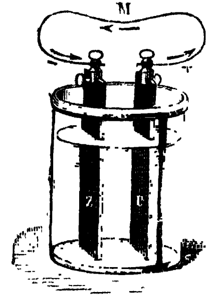


Fig. 797

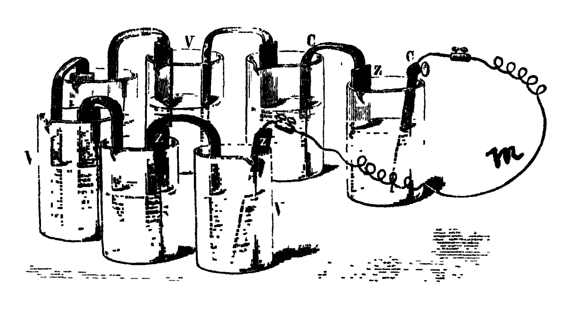


Fig. 798.

d'une pile (fig. 797 et 798), leurs potentiels *tendent à s'égaliser* (**604**). L'électricité circule, en suivant le conducteur extérieur, d'un pôle à l'autre. Un mouvement *continu* ou un *courant d'électricité* parcourt à la fois la pile et le conducteur extérieur interpolaire.

La différence de potentiel aux deux pôles d'une pile, cause du courant, est appelée **force électromotrice**.

Si l'on vient à interrompre le circuit conducteur, le courant électrique cesse : il se reproduit dès qu'on rétablit la communication.

Sens du courant. — On adopte pour *sens du courant* le sens du déplacement de l'électricité positive. Ce déplacement a lieu du pôle positif au pôle négatif dans le circuit extérieur et du pôle négatif au pôle positif à l'intérieur de la pile.

676. Premiers modèles de pile. — Pile à colonne de Volta. — Sur un socle isolant sont empilés, en colonne verticale : *un disque de cuivre, un disque de drap mouillé d'eau acidulée, un disque de zinc* (fig. 799), puis un disque de cuivre, un disque de drap, un disque de zinc; on répète la même succession, on termine en haut par un disque de zinc auquel on fixe un fil de cuivre, qui est le pôle négatif. Le premier cuivre est le pôle positif.

---

(1) Quand la pile est *bien isolée* et a son milieu relié au sol, le milieu a un potentiel nul, le pôle positif a un potentiel $\frac{1}{2}$ nE et le pôle négatif un potentiel $-\frac{1}{2}$ nE (la différence entre les deux pôles est nE).

Le poids des disques a l'inconvénient d'exprimer le liquide des rondelles de drap et de le faire ruisseler sur la surface extérieure,

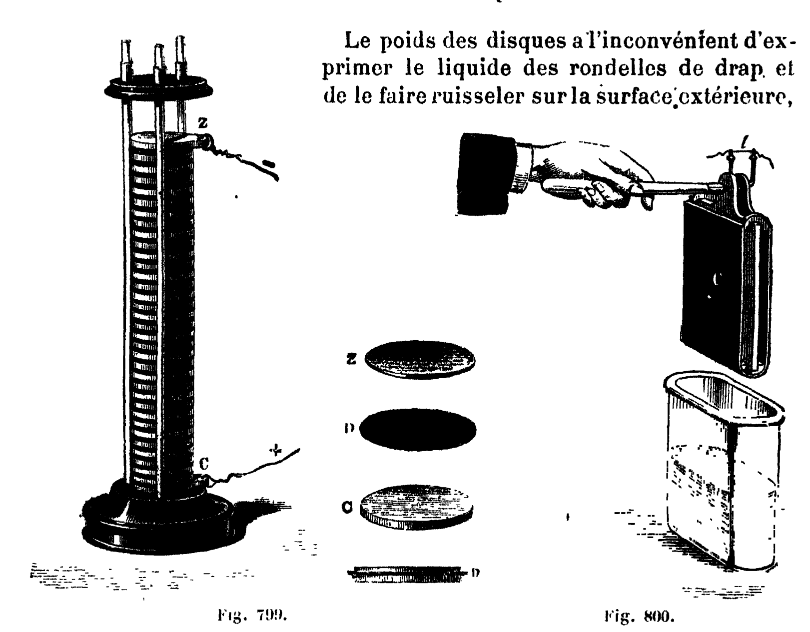


Fig. 799. Fig. 800.

ce qui établit des communications entre les éléments.

Dans la **pile à tasses** (fig. 798), chaque vase reçoit une lame de zinc et une lame de cuivre séparées par de l'eau acidulée. Le cuivre et le zinc de deux éléments consécutifs sont réunis par un fil de cuivre.

La **pile de Wollaston** est également formée de vases séparés. Dans chacun d'eux, la lame de cuivre C est repliée autour du zinc Z dont la sépare une *mince* couche d'eau acidulée (fig. 800).

Le courant des éléments précédents *s'affaiblit rapidement* (**722**).

HISTORIQUE DE LA FORMATION D'UN ÉLÉMENT DE PILE

677. Ce sont des phénomènes d'électricité de contact qui ont conduit Volta à la construction d'un élément de pile.

Différence de potentiel au contact de deux métaux. — Pour mettre en évidence le développement d'électricité au contact de deux métaux, Volta s'est servi d'un électroscope condensateur dont le plateau inférieur est un plateau de *zinc* verni à sa surface supérieure; on pose sur ce plateau un plateau de *cuivre* verni à sa surface inférieure. Si l'on réunit les deux surfaces *métalliques* par un *fil de cuivre* (fig. 801), le zinc se charge positivement dans son contact avec le cuivre, et le cuivre se charge négativement. En éloignant le fil de cuivre et en soulevant le plateau de cuivre, on voit que le cuivre est négatif, et le zinc positif.

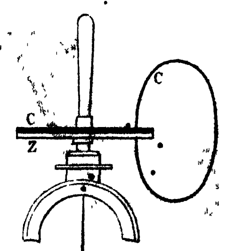


Fig. 801.

Le cuivre prend un potentiel négatif et le zinc un potentiel positif. La différence de potentiel dépend de la nature des corps et de leur température ; elle est indépendante de leur forme et de l'étendue de leur contact. Elle ne dépend pas de la valeur absolue du potentiel sur chacun. Quel que soit le potentiel du cuivre, le zinc prend sur le cuivre le même excès de potentiel.

Classement des métaux d'après leur signe. — Volta a rangé les métaux en une série où chaque métal était positif par rapport au suivant et négatif par rapport au précédent. Avec un électroscope gradué, il a mesuré les différences de potentiel pour les métaux pris deux à deux.

Représentation d'une différence de potentiel. — On représente par le symbole $A|B$ la différence $V_2 - V_1$ entre le potentiel V_2 du métal B et le potentiel V_1 du métal A : la différence est positive si le potentiel de B est supérieur au potentiel de A : on peut écrire $A|B = -B|A$.

Loi de Volta — Soit une lame de zinc Z intercalée entre deux fils de cuivre C_1 et C_2 (fig. 802). Quel que soit le potentiel V sur le fil de cuivre C_1, le potentiel sur le zinc est $V + C|Z$; sur le cuivre C_2, il est :

V, V+C|Z, V+C|Z+Z|C, C_1, Z, C_2

Fig. 802.

$$V + C|Z + Z|C \quad \text{ou} \quad V \text{ puisque } C|Z = -Z|C.$$

Les cuivres extrêmes C_1 et C_2 sont donc au même potentiel.

C'est un cas particulier de la *loi* de Volta : *Dans l'état d'équilibre électrique, la différence de potentiel de deux métaux* A *et* E *réunis par une chaîne de métaux quelconques est la même que si les deux métaux* A *et* E *se touchaient directement.* De là, l'équation symbolique :

$$A|B + B|C + C|D + D|E = A|E \text{ (1)}.$$

Conséquences. — 1° Deux métaux A et B, réunis par une soudure S, offrent la même différence de potentiel qu'en contact direct :

$$A|S + S|B = A|B.$$

2° Les extrémités d'une chaîne étant formées de deux métaux différents A et E, si l'on réunit les extrémités E et A, l'introduction du contact de E et A ajoute $E|A$ à la somme ; comme $A|E + E|A = A|A = 0$, *il ne se produit aucun courant quand on ferme une chaîne de métaux quelconques.*

Formation d'un élément de pile par l'interposition d'un liquide. — Dans l'élément de Volta, *cuivre, liquide, zinc, cuivre*, les deux extrémités polaires sont formées du même métal, mais elles offrent une différence de potentiel qui tient à l'*interposition d'un liquide* entre deux métaux de la chaîne métallique, zinc et cuivre.

Soit V le potentiel du fil de cuivre qui forme le pôle négatif (fig. 803), le potentiel du zinc qui touche ce pôle est $V + C|Z$; une séparation d'électricités contraires ayant aussi lieu au contact d'un solide et d'un liquide,

(1) *Vérification.* — Argent-Cuivre $A|C = 1$
Cuivre-Fer $C|F = 2$
Fer-Zinc $F|Z = 9$
Argent-Zinc $A|Z = 12$

$$A|C + C|F + F|Z = 1 + 2 + 9 = 12 = A|Z.$$

le potentiel du liquide sera $V + C|Z + Z|L$ et le potentiel du cuivre extrême $V + C|Z + Z|L + L|C = V'$.

$$V' - V = C|Z + Z|L + L|C \text{ (1)}.$$

Comme on n'a pas $Z|L + L|C = Z|C$; V' est différent de V.

L'expérience montre que $V' - V$ est ici positif. C'est la somme des différences $C|Z + Z|L + L|C$, que nous avons désignée par E (**674**).

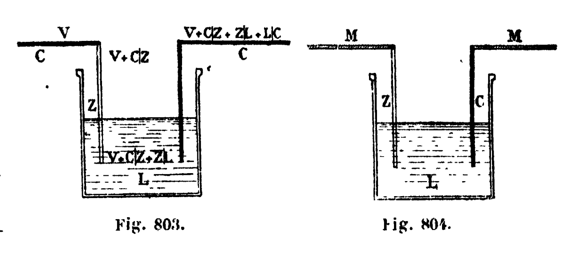


Fig. 803. Fig. 804.

EFFETS DU COURANT ÉLECTRIQUE

678. Dans le *circuit fermé* d'une pile et de conducteurs interpolaires, le courant électrique produit deux groupes d'effets :

1° ***Effets dans les conducteurs traversés par le courant.*** Ces effets sont *calorifiques, lumineux, chimiques, physiologiques.*

2° ***Effets à distance.*** Ce sont des effets *magnétiques.*

679. Comparaison des décharges et des courants de pile. — Avec des conducteurs portés à des potentiels différents par une machine électrostatique, nous avons observé des transmissions d'électricité, appelées *décharges.* Les phénomènes des décharges et les phénomènes du courant sont dus à une différence de potentiel entre deux conducteurs que l'on réunit. Dans les décharges le courant est brusque et l'égalisation de potentiel très rapide. La réunion des deux pôles d'une pile, dont les charges *se renouvellent* au fur et à mesure de la dépense, donne un *courant continu.*

680. Analogie hydraulique. — C'est à l'hydraulique qu'est empruntée l'expression de courant électrique. Une analogie se poursuit dans les particularités du courant électrique, aussi l'image d'un courant liquide peut guider dans l'étude du courant électrique.

Dans les deux courants, la différence des niveaux, le débit, la résistance du circuit interviennent d'une façon analogue :

---

(1) La nature du métal M des extrémités polaires d'un élément est indifférente. Soit en effet V le potentiel du pôle négatif M (fig. 804), le potentiel du zinc est $V + M|Z$,
le potentiel du liquide $V + M|Z + Z|L$,
le potentiel du cuivre $V + M|Z + Z|L + L|C$,
le potentiel du pôle positif $V + M|Z + Z|L + L|C + C|M = V'$
or $M|Z + C|M = -Z|M - M|C = -Z|C = C|Z$
donc $V' = V + C|Z + Z|L + L|C$, quel que soit M.

I. Entre deux réservoirs où la surface liquide a le même niveau, il ne peut s'établir de courant. Un courant a lieu dans une conduite T entre deux réservoirs R et R' à niveaux *différents* (fig. 805). Ce courant dépend de la pression due à la *différence h des niveaux* et il est caractérisé par le *débit*, ou la quantité de liquide qui traverse, en une seconde, chaque section du tuyau. Le tuyau de circulation intervient par une résistance qu'il oppose à l'écoulement.

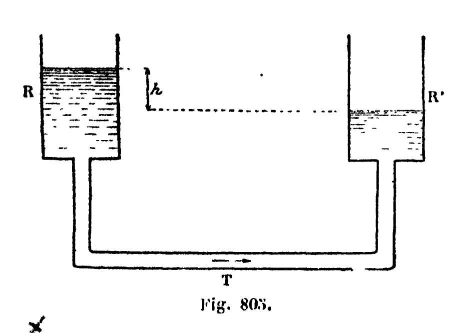


Fig. 805.

Le débit est faible par un tuyau long et étroit; par un tube court et de grand diamètre il est considérable.

II. Pour un courant électrique, on a de même à considérer : 1° une force électromotrice ou pression électrique proportionnelle à **la différence de potentiel** aux deux pôles de la pile; 2° un **débit** ou quantité d'électricité qui traverse par seconde chaque section de circuit: 3° une **résistance** du circuit.

FORCE ÉLECTROMOTRICE, INTENSITÉ RÉSISTANCE

MESURE DE LA FORCE ÉLECTROMOTRICE

681. La différence de potentiel aux deux pôles d'un élément étant la même (**673**) quand l'un des pôles est relié au sol ou quand les deux pôles sont isolés, on pourrait la mesurer en mettant le pôle négatif d'un élément de pile en communication avec le sol et en reliant le pôle positif au bouton d'un *électroscope gradué*. Les électroscopes ordinaires ne donnent pas d'écart avec un seul élément; mais, comme la différence de potentiel est proportionnelle au nombre des éléments, on peut former une pile de n éléments identiques, en série, joindre au sol le pôle négatif et relier le pôle positif à l'électroscope. La déviation est mesurable si n est assez grand.

Avec une seconde pile d'éléments identiques, différents des précédents, pris *en même nombre n*, on observe une autre déviation.

Le rapport des forces électromotrices des deux piles est égal

Fig. 806.

au rapport des charges successives de l'électroscope.

Les forces électromotrices se mesurent souvent avec un *électromètre à quadrants*, qui est très sensible.

682. Électromètre à quadrants. — *Description* (fig. 806 et 807). — Une plaque mince d'aluminium P découpée suivant deux secteurs d'environ 30°, est soutenue en son milieu par un fil métallique fin et son plan peut tourner horizontalement, au-dessus d'un système de quatre qua-

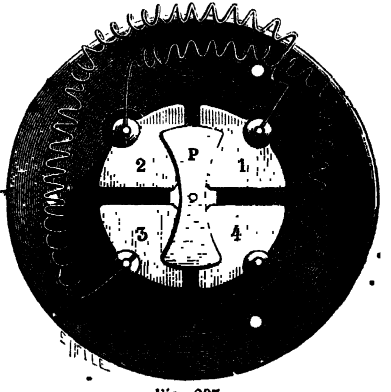


Fig. 807.

drants d'un même cercle, indépendants et *isolés*. Ces quadrants sont fixés au couvercle en ébonite de la cage de l'appareil à l'aide de tiges conductrices *c*, par lesquelles les quadrants opposés (1 et 3, 2 et 4) sont reliés en diagonale.

Par le fil métallique, la plaque d'aluminium reçoit une charge constante de l'un des pôles d'une pile auxiliaire P dont l'autre pôle va au sol (1). Quand les deux paires de quadrants sont réunies on tourne un tambour qui soutient le fil de torsion pour que l'axe de figure de la plaque mobile soit parallèle aux lignes de séparation des quadrants. L'axe de figure doit être en outre au centre du cercle des quadrants.

Fonctionnement. — Les pôles de l'élément dont on cherche la différence de potentiel sont reliés séparément par deux fils *longs et fins* *f*, le pôle positif à la paire de quadrants 1 et 3, le pôle négatif à la paire 2 et 4. Appelons V le potentiel de la plaque d'aluminium chargée positivement, V_1 et V_2 les potentiels respectifs des deux paires de quadrants ou des deux pôles.

Supposons $V > V_1 > V_2$. La plaque mobile est plus repoussée par les quadrants de potentiel V_1 que par les quadrants de potentiel V_2. Elle se fixe quand la torsion du fil métallique fait équilibre aux forces électriques. Lorsque les potentiels V_1 et V_2 sont très petits par rapport au potentiel V de la plaque mobile, la déviation est ***proportionnelle à la différence*** $V_1 - V_2$ des potentiels des pôles.

Pour mesurer de *petites* déviations, la plaque mobile porte, dans le prolongement du fil de torsion, une tige verticale à laquelle est fixé un petit miroir concave *m* qui tourne avec la plaque. L'observateur suit sur une règle horizontale transparente les déplacements de l'image d'un fil fin réfléchi sur le miroir (**751**); les écarts de l'image sont proportionnels aux déviations de la plaque.

683. Unité de force électromotrice. — **L'unité de force électromotrice** est le **volt**; le volt est un peu supérieur à la force électromotrice d'un élément de Volta. Les éléments de pile usuels ont des différences de potentiel comprises entre 0,3 et 2,5 volts.

---

(1) La pile de charge est formée d'une centaine de petits éléments zinc, platine et eau, groupés en série (fig. 808) et disposés sur une plaque d'ébonite au-dessous de la cage de l'électromètre (fig 808). Une tige métallique flexible *t* établit ou suspend la charge par un contact en K.

Fig. 808.

MESURE DU DÉBIT D'UN COURANT

Le débit d'un courant électrique est évalué par la mesure de certains effets du courant.

684. Méthode chimique. — **Décomposition de l'eau.** — En plongeant dans de l'eau acidulée par l'acide sulfurique deux lames de platine reliées respectivement aux pôles d'une pile, il se dégage, sur les lames, des gaz que l'on recueille dans un voltamètre.

Voltamètre. — Un voltamètre est un vase contenant de l'eau acidulée et dont le fond est traversé par deux fils isolés l'un de l'autre qui portent les lames de platine appelées **électrodes**. Chaque électrode est couverte par une éprouvette pleine d'eau acidulée (fig. 809). A l'électrode reliée au pôle négatif ou négative, il se dégage de l'*hydrogène*. A l'électrode positive, il se dégage de l'*oxygène*.

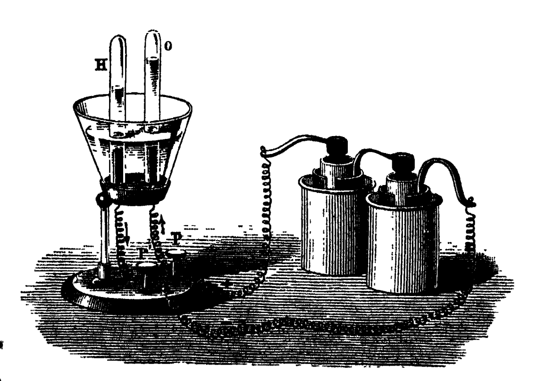


Fig. 809.

Voltamètres en série. — Si plusieurs voltamètres se suivent, la *même quantité d'hydrogène* se dégage dans tous. Le courant décompose donc une même quantité d'eau en tous les points de son circuit.

Voltamètres parallèles. — Bifurquons en A le circuit d'une pile en deux branches semblables qui se réunissent de nouveau en B, et intercalons trois voltamètres : l'un en V, dans la partie non bifurquée, les deux autres V′ et V″, *identiques,* dans les deux branches (fig. 810). On peut admettre que la quantité d'électricité qui passe

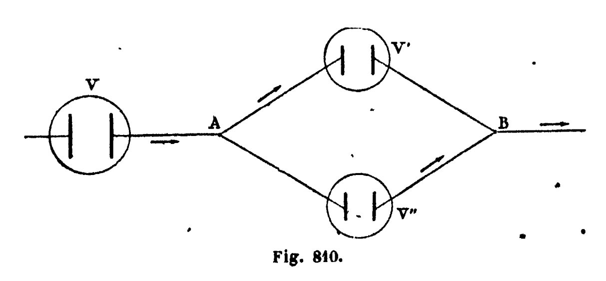


Fig. 810.

en V′ ou V″ est la même et qu'elle est la moitié de celle qui passe en V. Or, le volume d'hydrogène dégagé en V′ ou V″ est le même et il est la **moitié** du volume dégagé dans le même temps en V (1). Les volumes étant proportionnels aux masses, *la masse d'hydrogène dégagée est proportionnelle à la quantité d'électricité qui passe.*

Lorsque la masse d'hydrogène dégagé pendant le passage du courant est proportionnelle au temps, le courant est *constant.*

Intensité. — On appelle intensité d'un courant constant la *quantité d'électricité qui passe par seconde dans chaque section transversale du circuit.*

Unité d'intensité. — L'unité d'intensité, appelée **ampère,** est l'intensité d'un courant constant qui dégage dans un voltamètre $\frac{1}{96\,600}$ de gramme d'hydrogène par seconde ($0^{mmg},0103$).

Un courant qui dégage, en t secondes, p grammes d'hydrogène, a une intensité I donnée par l'équation $p = \frac{\mathrm{I}\,t}{96\,600}$.

Unité de quantité d'électricité. — L'unité de quantité, appelée **coulomb**, est la quantité d'électricité qui dégage dans un voltamètre $\frac{1}{96\,600}$ de gramme d'hydrogène. Si le courant est *constant,* un coulomb est la quantité d'électricité qui traverse, par seconde, chaque section du circuit quand l'intensité est un ampère.

I étant l'intensité d'un courant en ampères, It est le nombre de coulombs qui parcourent le circuit en t secondes.

685. Méthode magnétique. — L'emploi du voltamètre est long, il ne donne que l'intensité moyenne ; en outre, l'introduction d'un liquide dans un circuit affaiblit notablement l'intensité du courant. Les effets magnétiques du courant, observés au moyen de galvanomètres, sont d'un usage plus pratique.

Galvanomètre. — Un galvanomètre consiste en un fil conducteur, couvert de soie pour l'isolement, enroulé un grand nombre de fois, dans le même sens, sur un cadre orienté dans le méridien magnétique et entourant un aimant mobile en son centre autour d'un axe vertical (fig. 811). Quand on fait passer un courant dans le fil du cadre, *l'aimant est dévié.*

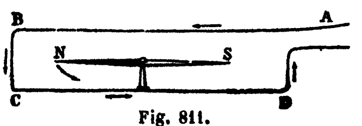


Fig. 811.

(1) Si les deux branches sont différentes, les volumes d'hydrogène dégagés y sont différents, mais leur somme est toujours égale au volume dégagé en V.

Les petites déviations de l'aimant sont proportionnelles aux intensités. — Désignons par α, α' α'' les petites déviations de l'aimant du galvanomètre, dues à différents courants, par p, p', p'' les masses d'hydrogène dégagées en une seconde, par les mêmes courants, *dans un voltamètre* qui fait partie du même circuit; on constate que les déviations sont *proportionnelles* aux masses correspondantes d'hydrogène, c'est-à-dire aux intensités.

Si le courant dégage $\frac{10}{96\,600}$ de gramme d'hydrogène par seconde, la déviation correspond à une intensité de dix ampères.

Quelle que soit sa position dans le circuit, un galvanomètre, comme un voltamètre, donne une indication constante pour un même courant, ce qui confirme que l'*intensité* d'un courant *est la même en tous les points d'un circuit.* La quantité d'électricité qui traverse, en un même temps, différentes sections du circuit étant la même, il n'y a accumulation d'électricité en aucun point du circuit (comme pour un liquide qui s'écoule entre deux réservoirs).

MESURE DE LA RÉSISTANCE

686. L'intensité du courant d'une pile varie avec la nature et les dimensions du circuit interpolaire. Le courant s'affaiblit, comme par un accroissement de **résistance**, quand on augmente la longueur d'un conducteur ou quand on diminue sa section.

La connaissance des résistances apportées par les différents conducteurs dans un circuit traversé par un courant est indispensable pour régler à l'avance la grandeur des effets que l'on veut produire.

Résistances égales. — Deux conducteurs sont dits, avoir des résistances *égales,* s'ils produisent *le même affaiblissement* quand on les substitue l'un à l'autre dans le circuit d'un courant.

Résistances multiples. — Deux résistances égales placées bout à bout dans un circuit forment une résistance *double; n* résistances égales consécutives forment une résistance *n* fois plus grande. D'après ces définitions, une résistance est une grandeur *mesurable.*

Unité de résistance. — L'unité de résistance, appelée **ohm**, est un étalon réalisé matériellement; il a la résistance d'une colonne de *mercure pur* à 0°, de 106,3 cm. de longueur et de 1 mm² de section (1).

(1) On définit encore l'ohm : une masse de mercure à 0°, égale à 14 gr. 4521 qui occupe 106,3 centimètres de longueur dans un tube de section intérieure constante.

Boites de résistances. — On construit des résistances de 1, 2, 3, 5, 10... 100 ohms et on les réunit dans des *boîtes* (fig. 812).

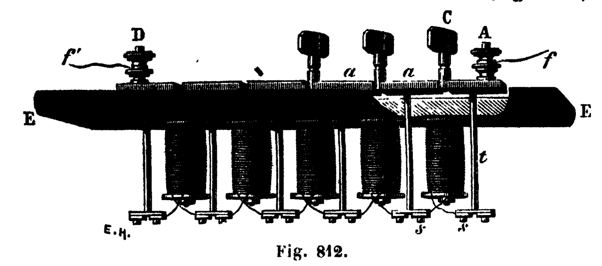


Fig. 812.

Chacune des résistances est formée de fil de maillechort, isolé, enroulé sur une bobine de bois ; les extrémités du fil sont soudées à deux tiges t, en cuivre, sans résistance appréciable.

Dans une *boîte de résistances,* les extrémités des fils de deux bobines consécutives aboutissent par une tige t à un bloc de laiton a, fixé sur le couvercle en ébonite E de la boîte (fig. 813). Toutes les bobines sont traversées par le courant quand on attache aux blocs extrêmes les deux fils de la pile. On *supprime* une bobine du circuit *en insérant* entre les blocs qui la comprennent *une fiche* de laiton K qui fait passer directement le courant, d'un bloc au suivant. *Les bobines traversées correspondent aux fiches qui n'ont pas été insérées.*

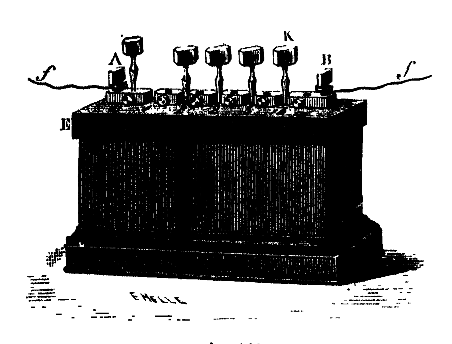


Fig. 813.

Mesure d'une résistance. Pour évaluer une résistance en ohms, on l'introduit dans un circuit qui comprend une pile *constante* et un galvanomètre. Après avoir observé la déviation de l'aiguille, on substitue à la résistance des bobines qui donnent le nombre d'ohms nécessaires *pour obtenir la même déviation* du galvanomètre.

687. Résultats. — La résistance d'un conducteur est *proportionnelle à sa longueur, en raison inverse de sa section.*

$r = \rho \frac{l}{s}$ (1), le facteur ρ est la *résistance spécifique* du conduc-

(1) Un fil de longueur l et de section s *a la même résistance* qu'un fil de même nature de longueur $\frac{l}{2}$ et de section $\frac{s}{2}$, ou de longueur $\frac{l}{p}$ et de section $\frac{s}{p}$, ou de longueur $\frac{l}{s}$ et de section 1 (en divisant par s la longueur et la section), puisque $\frac{l}{s}$ reste constant.

teur (1), ou la résistance d'un bloc de la substance, qui a 1 cm. de longueur et 1 cm^2 de section.

Métaux et Alliages. — *Les métaux qui conduisent le mieux la chaleur sont aussi ceux qui conduisent le mieux l'électricité. L'argent et le cuivre sont les meilleurs conducteurs.*

La résistance d'un métal *augmente avec la température;* pour la plupart des métaux purs, l'accroissement est d'environ 0,4 pour 100° ; les métaux impurs et les alliages sont plus résistants que les métaux purs. La résistance du maillechort (cuivre, zinc et nickel) augmente peu avec la température.

Liquides. — Les solutions salines ou acides sont les liquides les plus conducteurs; leur résistance est, toutefois, beaucoup plus grande que celle des métaux.

Isolants. — Les corps dits isolants (verre, porcelaine, soie, résines, eau distillée, huiles) ont une résistance extrêmement grande par rapport à celle des métaux et des solutions salines. La résistance des liquides et des isolants *diminue quand la température s'élève* (2).

RÉSISTANCE SPÉCIFIQUE DES MÉTAUX EN MICROHMS.

Argent	1,50	Aluminium	2,6
Cuivre pur	1,56	Or	2,2
Fer pur	9	Zinc	5,75
Platine	11	Mercure	94

Voici, en ohms, les résistances à 0° de quelques conducteurs ayant 1 mètre de longueur et 1 millimètre carré de section :

Cuivre	0,015	Charbon de cornue	7,08
Mercure	0,940	Acide azotique	21,50

La résistance d'un fil de cuivre de 50 mètres de longueur et un millimètre de diamètre est sensiblement égale à un ohm.

688. Résistance d'un élément de pile. — Chaque élément de pile contribue, par *sa résistance*, à diminuer le débit.

La résistance d'un élément de pile provient spécialement de ses *liquides*. Comme la résistance spécifique d'un liquide est incomparablement plus grande que celle d'un métal, on diminue la résistance r de chacun des liquides $\left(r = \rho \frac{l}{s}\right)$ *en réduisant l'écartement*

(1) La résistance d'une conduite en hydraulique est proportionnelle à sa longueur, en raison inverse de sa section et proportionnelle à un coefficient spécifique.

(2) Une couverture de coton isole un fil métallique pour de faibles courants; pour de forts courants on interpose du caoutchouc entre le métal et le coton. L'isolement nécessaire dépend du voltage et du milieu. Un bon isolant pour un courant de pile peut ne plus isoler pour le courant d'une décharge de condensateur.

l des plaques métalliques qui le limitent et *en augmentant* leur surface s. Ces conditions sont remplies dans l'élément de Wollaston, l'élément Bunsen usuel et les accumulateurs.

689. Résistance totale d'un circuit. — Dans un circuit formé d'éléments de pile et de conducteurs qui se suivent en série, on évalue séparément la résistance des diverses parties d'après leurs dimensions et leurs résistances spécifiques. La somme est la résistance *totale* R :

$$R = \rho\frac{l}{s} + \rho'\frac{l'}{s'} + \rho''\frac{l''}{s''} + \cdots = \Sigma\rho\frac{l}{s}.$$

LOI D'OHM

690. Une source d'électricité est définie par sa force électromotrice et sa résistance ; le circuit extérieur l'est par sa résistance.

L'intensité d'un courant augmente lorsque la force électromotrice augmente ou lorsque la résistance totale du circuit diminue. Il y a entre les trois grandeurs : *force électromotrice* ou différence de potentiel aux pôles de la pile ouverte, *intensité du courant* et *résistance du circuit* une relation appelée loi d'Ohm. Elle s'énonce comme il suit : **L'intensité d'un courant** *est proportionnelle à la* **force électromotrice** *de la source électrique qui produit le courant et en raison inverse de* **la résistance totale** *du circuit.*

Exprimée en **ampères,** *l'intensité* I *est le quotient de la force électromotrice* E *en* **volts** *par la résistance totale* R *en* **ohms**; la résistance totale comprend la résistance intérieure λ de la source et la résistance r des conducteurs extérieurs :

$$I = \frac{E}{R} = \frac{E}{\lambda + r}.$$

En hydraulique, le débit est de même proportionnel à la différence des niveaux des deux réservoirs entre lesquels l'écoulement a lieu et en raison inverse de la résistance des conduites.

On peut déduire la loi d'Ohm (1) d'une proposition établie par Ohm et

(1) La loi d'Ohm avait été trouvée par Pouillet au moyen de mesures d'intensité.

Les deux pôles d'une pile constante sont d'abord reliés par un conducteur de résistance r_1 ; on mesure l'intensité I_1 du courant. Si le conducteur interpolaire de résistance r_1 est remplacé par une résistance $2r_1$, l'intensité I_2 obtenue n'est pas la moitié de I_1 ; en effet, la résistance totale du circuit n'a pas doublé, puisque le courant traverse la pile dont la résistance est λ. Avec une résistance interpolaire r on a une intensité I ;

on trouve : $I_1 = \frac{E}{\lambda + r_1}$, $I_2 = \frac{E}{\lambda + 2r_1}$ et $I = \frac{E}{\lambda + r}$;

La valeur de λ qu'on tire de ces deux équations est la même et la constance du produit $I_1(\lambda + r_1) = I_2(\lambda + 2r_1) = I(\lambda + r)$ caractérise la pile, on l'appelle *force électromotrice*.

basée sur la mesure des charges électrostatiques qu'on observe le long des conducteurs d'un circuit de pile.

691. Charges électrostatiques sur un circuit. — Un électroscope condensateur, mis en contact avec un point A d'un circuit parcouru par un courant, accuse une charge d'électricité statique. Ce fait avait été constaté par Volta.

Si le point A est réuni par communication lointaine à un électroscope gradué, la charge obtenue mesure le *potentiel* au point considéré. Positif au voisinage du pôle positif, le potentiel décroît du pôle positif au pôle négatif. La chute progressive de potentiel le long d'un circuit est comparable à la diminution de pression le long d'un tuyau entre deux réservoirs à niveaux différents (fig. 814).

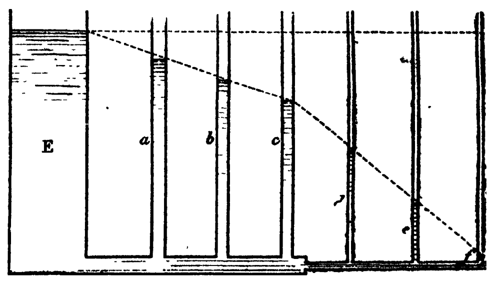


Fig. 814.

692. Différence de potentiel entre deux points d'un circuit. — Un électromètre à quadrants, dont les deux paires de quadrants sont reliées respectivement par des fils à deux points A et B d'un circuit (fig. 815), donne la différence des potentiels en ces deux points. Quand on met en communication avec le sol un point quelconque du circuit, les valeurs *absolues* des potentiels sont modifiées le long du circuit, mais la différence des potentiels entre les deux points A et B reste la même.

693. Loi d'Ohm pour un conducteur. — 1° Dans un circuit où l'***intensité reste constante***, *les chutes de potentiel* $a - b$ et $a' - b'$ (fig. 816) entre les extrémités de conducteurs différents AB et A'B' *sont proportionnelles à leurs résistances*.

$$\frac{a-b}{a'-b'} = \frac{r}{r'}$$

ou

$$\frac{a-b}{r} = \frac{a'-b'}{r'}.$$

D'après l'expression $r = \rho \frac{l}{s}$ (**687**), dans un conducteur ***homogène de section constante***, r est proportionnel à la *longueur*; il en est de même de la chute de potentiel.

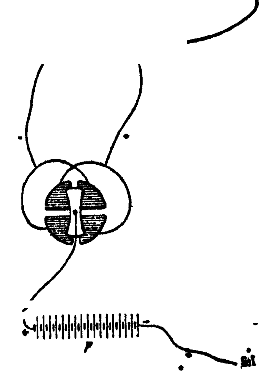


Fig. 815.

Pour le vérifier, on relie respectivement aux deux paires de quadrants d'un électromètre deux

points d'un conducteur homogène, de section constante, la déviation est proportionnelle à la distance des deux points.

Développons le conducteur sur une horizontale AB (fig. 817). Aux extrémités de AB, élevons des ordonnées AA′ et BB′, égales aux potentiels des extrémités. Les points intermédiaires ont pour potentiels les ordonnées de la droite A′B′; les différences de potentiel varient donc proportionnellement aux longueurs.

L'intensité restant constante, on vérifie de même que les chutes de potentiel, aux extrémités de conducteurs de même substance et de même longueur varient en raison inverse de la *section*.

2° Dans un circuit où l'on *fait varier l'intensité*, les *différences de potentiel* entre deux points A et B d'un même conducteur *sont proportionnelles aux intensités* (1).

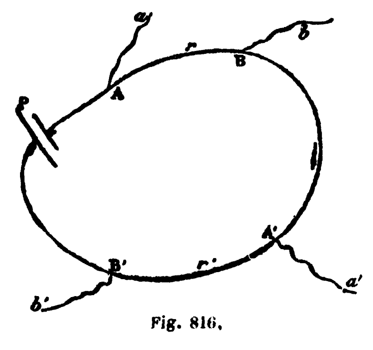


Fig. 816.

$$\frac{a-b}{a_1-b_1}=\frac{I}{I_1}$$

ou
$$\frac{a-b}{I}=\frac{a_1-b_1}{I_1}.$$

De ces deux propositions démontrées par l'expérience, on déduit d'abord qu'entre deux points A et B d'un conducteur, la chute de potentiel due à la résistance *r* est proportionnelle à *r*, lorsque I est constant : $a-b=gr$; mais, comme la chute entre A et B doit aussi être proportionnelle à I,

$$g=hI \quad \text{d'où} \quad a-b=hIr.$$

Les unités ont été choisies de telle façon que le coefficient h soit égal à 1. Alors, $a-b$ est exprimé en volts, I en ampères et r en ohms.

694. Extension de la loi d'Ohm au circuit entier. — Portons sur une horizontale des longueurs égales aux résistances du circuit coupé en A et développé; menons aux différents points de cette horizontale des ordonnées égales aux potentiels en ces points :

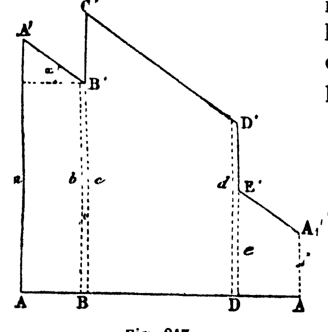


Fig. 817.

$$AA'=a,\ BB'=b,\ BC'=c,$$
$$DD'=d,\ DE'=e,\ A_1A'_1=h.$$

L'application de la loi d'Ohm aux conducteurs successifs AB, BD, DA, du circuit (fig. 817) donne :

$$I=\frac{a-b}{r_1}=\frac{c-d}{r_2}=\frac{e-h}{r_3}; \text{ d'où}$$

$$I=\frac{a-b+c-d+e-h}{r_1+r_2+r_3}.$$

Admettons qu'au point de contact de deux conducteurs hétérogènes, le

---

(1) Si l'un des côtés du contact A est relié au sol, on a $h=0$; les horizontales de la figure 817 sont alors transportées parallèlement en A'_1.

potentiel varie brusquement et que, à circuit ouvert ou fermé, les différences de potentiel au contact ne changent pas.

Posons $a - h = \varepsilon_1$ en A, $c - b = \varepsilon_2$ en B, $e - d = \varepsilon_3$ en D; ε_1 et ε_2 sont positifs, ε_3 est négatif.

$$I = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{r_1 + r_2 + r_3} = \frac{\Sigma\varepsilon}{\Sigma r}.$$

$\Sigma\varepsilon$ est la somme algébrique des forces électromotrices aux contacts.

Appliquée à un circuit entier, la loi d'Ohm s'exprime par l'équation $I = \frac{\Sigma\varepsilon}{\Sigma r} = \frac{E}{R}$, semblable à l'équation relative à un conducteur : le numérateur est la force électromotrice de la pile; le dénominateur est la résistance totale du circuit.

En circuit fermé, le potentiel varie brusquement aux différents contacts hétérogènes; partout ailleurs, le potentiel varie d'une façon continue et les droites représentatives des potentiels sont inclinées. L'intensité I ayant la même valeur sur tout le circuit, l'inclinaison α des droites représentatives des potentiels reste la même :

$$I = \frac{a - b}{r_1} = tg\alpha.$$

En circuit ouvert, il y a variation brusque de potentiel aux contacts hétérogènes, mais aux points intermédiaires, les potentiels restent constants, leurs droites représentatives sont *horizontales* (fig. 819).

Fig. 818.

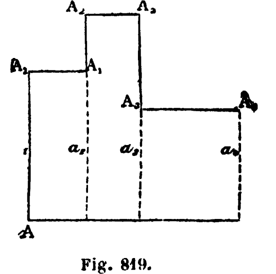


Fig. 819.

Par exemple, pour deux éléments (fig. 818) :

$$\Sigma\varepsilon = \underbrace{C|Z + Z|L + L|C}_{e} + \underbrace{C|Z + Z|L + L|C}_{e} + \underbrace{C|M + M|M' + M'|M'' + M''|C}_{0}.$$

Habituellement, dans les tracés graphiques des chutes de potentiel le long d'un circuit, on ne figure pas les différences de potentiel à tous les contacts, mais *une différence unique* pour chaque élément, *localisée* par exemple à son pôle positif et égale à la somme algébrique des différences partielles dans l'élément. Il est inutile de tenir compte des différences relatives aux contacts métalliques; car, d'après la loi de Volta, elles sont sans effet en circuit ouvert ou fermé.

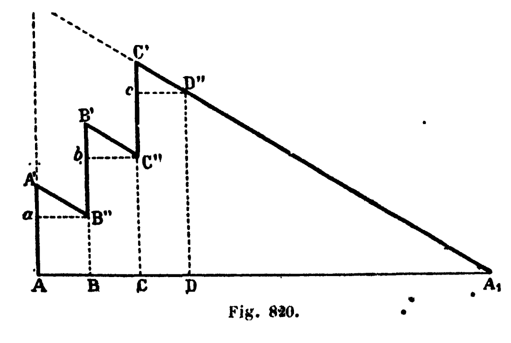


Fig. 820.

Formons, par exemple, un circuit (fig. 820) qui comprend : 1° Trois éléments identiques, consécutifs, chacun de force électromotrice $AA' = e$, et de résistance intérieure $AB = \lambda$; 2° une résistance extérieure $DA_1 = r$. Les extrémités A et A_1 seraient réunies en A, en circuit fermé, sans le développement rectiligne figuratif. Pour simplifier, le potentiel du point A est supposé nul.

$$AA' = B''B' = C''C' = e \qquad AB = BC = CD = \lambda$$

$aA' = bB' = cC' = I\lambda$, chute de potentiel due à chaque résistance λ.

$D''D = Ir$, chute de potentiel due à la résistance r du circuit extérieur.

Si l'on suit le circuit, en partant de A pour revenir en A_1 ou A,

on a $e - I\lambda + e - I\lambda + e - I\lambda - Ir = 0$ d'où $I = \dfrac{3e}{3\lambda + r} = \dfrac{E}{R}$;

$3e = E$, force électromotrice totale, $3\lambda + r = R$, résistance totale.

695. Résumé de la loi d'Ohm. — La loi d'Ohm s'applique : 1° à un conducteur, de résistance r, traversé par un courant d'intensité I :

$$e = Ir,$$

e représente la différence de potentiel aux extrémités du conducteur.

2° à un circuit, de résistance R, traversé par un courant d'intensité I :

$$E = IR,$$

E désigne la différence de potentiel aux deux pôles de la pile ouverte.

696. Différence de potentiel aux deux pôles d'une pile en circuit fermé. — Soit $n\lambda$ la résistance de la pile, r la résistance extérieure, R la résistance totale du circuit; $R = n\lambda + r$.

A circuit fermé, la différence de potentiel E' entre les pôles est inférieure à la force électromotrice de la pile ouverte.

En appliquant la loi d'Ohm à la résistance extérieure, puis au circuit complet, on a :

$$Ir = E' \qquad I(n\lambda + r) = E.$$

$E - E' = In\lambda$ est la chute de potentiel due à la pile.

$$\frac{E'}{E} = \frac{r}{n\lambda + r} = \frac{1}{\frac{n\lambda}{r} + 1}.$$

E' est d'autant plus voisin de E que la résistance $n\lambda$ de la pile est plus faible par rapport à la résistance extérieure r.

APPLICATIONS DE LA LOI D'OHM

697. Groupement des éléments d'une pile. — On dispose de n éléments *identiques*. Quel que soit leur groupement, *chaque élément agit comme s'il était seul.*

I. **Groupement en série** (fig. 821). — *Le pôle positif de chaque élément est relié au pôle négatif de l'élément suivant.*

Soit E la force électromotrice d'un élément, nE sera la force électromotrice totale, car les forces électromotrices *s'ajoutent* comme

les pressions d'une série de pompes qui élèvent l'eau *par degrés successifs*, pour pousser un courant liquide dans un même tuyau.

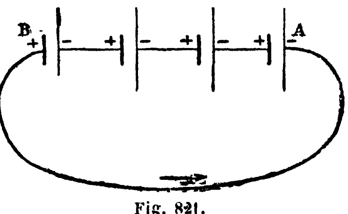


Fig. 821.

Si λ est la résistance d'un élément, $n\lambda$ est la résistance de la pile. Désignons par r la résistance extérieure, la résistance totale est $R = n\lambda + r$. D'après la loi d'Ohm :

$$I = \frac{nE}{n\lambda + r}.$$

Si la résistance extérieure est assez grande pour que la résistance de la pile soit négligeable : $I = \frac{nE}{r}$, l'intensité est proportionnelle au nombre n des éléments (1).

Avec une résistance extérieure négligeable, $I = \frac{E}{\lambda}$, l'intensité est indépendante du nombre des éléments; dans ce cas, le groupement en série ne convient pas.

S'il y a dans le circuit n' éléments, de résistance λ' et de force électromotrice E', opposés à la pile principale, la force électromotrice résultante est $nE - n'E'$; et $I = \frac{nE - n'E'}{n\lambda + n'\lambda' + r}$.

II. **Groupement en batterie ou en surface** (fig. 823). — *Les pôles de même nom sont respectivement réunis entre eux;* les pôles positifs aboutissent en B, les pôles négatifs en A.

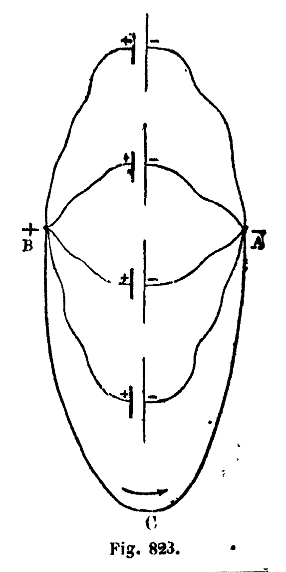


Fig. 823.

La force électromotrice est *celle d'un seul élément;* des pompes qui élèvent séparément l'eau à un même niveau et aboutissent à une même conduite élèvent de même l'eau à ce niveau commun.

La résistance intérieure de l'élément *unique* formé par les éléments associés est inversement proportionnelle à la surface des lames (2). Cette surface étant n fois plus

(1) Dans ce cas, si le conducteur extérieur est formé d'un fil unique de section uniforme, l'intensité du courant est proportionnelle à la section du fil, en raison inverse de sa longueur, ce qui vérifie la relation $r = \rho \frac{l}{s}$.

(2) Cette disposition équivaut à un élément unique de grande surface; elle évite l'emploi de trop grandes plaques dont le transport est incommode.

grande que pour un élément simple, la résistance de la pile est $\frac{\lambda}{n}$.

Désignons par r la résistance extérieure ACB, la résistance totale est $R = \frac{\lambda}{n} + r$. D'après la loi d'Ohm : $I = \frac{E}{\frac{\lambda}{n} + r}$.

Pour une résistance extérieure très petite, l'intensité est $\frac{nE}{\lambda}$, proportionnelle au nombre des éléments (1).

Si la résistance extérieure est grande par rapport à la résistance de la pile, $I = \frac{E}{r}$, l'intensité est indépendante du nombre des éléments; le groupement en surface n'est pas alors avantageux.

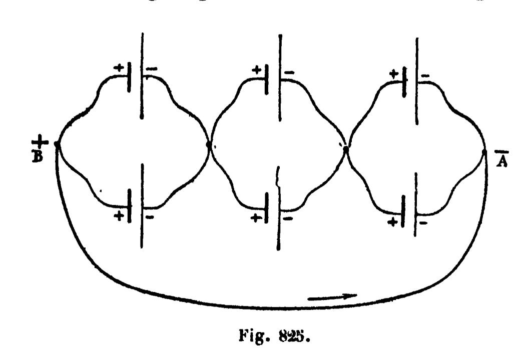


Fig. 825.

L'emploi des accumulateurs, dont la résistance intérieure est très faible, rend actuellement plus rare le groupement en surface.

III. **Groupement mixte** (fig. 825). — *On forme un certain nombre de batteries que l'on associe ensuite en série.*

m éléments par batterie; p nombre de batteries; nombre total des éléments $mp = n$.

Chaque batterie ayant une force électromotrice E et une résistance $\frac{\lambda}{m}$, la pile a une force électromotrice pE et une résistance $\frac{p\lambda}{m}$.

$$I = \frac{pE}{\frac{p\lambda}{m} + r}.$$

L'intensité est *maximum* quand **la résistance de la pile est égale à la résistance extérieure.**

L'intensité $I = \frac{E}{\frac{\lambda}{m} + \frac{r}{p}}$ est maximum si le dénominateur est minimum. Or, le produit des deux termes du dénominateur $\frac{\lambda}{m} \cdot \frac{r}{p} = \frac{r\lambda}{n}$ étant constant, leur somme est minimum quand ils sont égaux

$$\text{alors } \frac{\lambda}{m} = \frac{r}{p} \quad \text{ou} \quad r = \frac{p\lambda}{m}.$$

(1) **Un élément, de force électromotrice 1^v, et de résistance $0^{\omega},1$, donne 10 ampères en court circuit; dix éléments en batterie, donneront 100 ampères.**

On choisit le groupement qui réalise *le mieux* cette condition : groupement en série pour une grande résistance extérieure et groupement en surface pour une faible résistance extérieure.

698. Débit des machines électrostatiques. — Les machines électrostatiques produisent, comme les piles, un courant électrique. Leurs deux pôles étant réunis par un fil conducteur, le courant parcourt un circuit fermé qui comprend deux parties : 1° une partie extérieure, du pôle positif au pôle négatif; 2° une partie intérieure, du pôle négatif au pôle positif à travers la machine.

Si l'on a intercalé entre les deux pôles un galvanomètre très sensible, à spires bien isolées, la déviation est, comme le débit, proportionnelle à la vitesse de la rotation. Cette déviation correspond seulement à quelques millièmes d'ampère; l'*intensité du courant* est donc *très petite*, bien que la force électromotrice soit très élevée. La résistance intérieure d'une machine électrostatique atteindrait habituellement plusieurs millions d'ohms.

Les **piles**, au contraire, avec une petite force électromotrice, ont un *débit considérable* si leur circuit n'est pas trop résistant.

Le courant d'une pile dans un circuit peu résistant ressemble au courant d'un fleuve qui roule de grandes masses d'eau avec une faible pente; une machine électrique ne fournit qu'un mince filet torrentiel tombant d'une très grande hauteur.

699. Courants dérivés. — En un point A du circuit d'une pile, le courant se partage en plusieurs branches de résistance r, r', qui se réunissent en B (fig. 826). On donne E, r, r', r''... R; on cherche I, i, i', i''.

L'intensité I dans le circuit principal est la somme des intensités dans les branches de dérivation : $I = i + i' + i'' + ... = \Sigma i$.

Fig. 826.

Désignons par a et b les potentiels en A et B, et appliquons la loi d'Ohm aux conducteurs A C B, A D B, A E B.

$$a - b = ir = i'r' = i''r''... \text{ d'où } a - b = \frac{i}{\frac{1}{r}} = \frac{i'}{\frac{1}{r'}} = \frac{i''}{\frac{1}{r''}} = \frac{I}{\Sigma \frac{1}{r}}$$

$$\text{on en déduit} \quad i = \frac{I}{r \Sigma \frac{1}{r}}, \quad i' = \frac{I}{r' \Sigma \frac{1}{r}} ... \quad I = (a - b) \Sigma \frac{1}{r} = \frac{a - b}{r_1}.$$

La résistance r_1 d'un conducteur unique *équivalent* à l'arc multiple est donnée par $\frac{1}{r_1} = \Sigma \frac{1}{r}$ ($r_1 = \Sigma r$ se rapporte à des conducteurs qui se suivent).

Soit R la résistance de la partie non divisée du circuit et E la force électromotrice de la pile, la loi d'Ohm appliquée au circuit entier donne :

$$I = \frac{E}{R + r_1}.$$

Arc double. $i = \dfrac{I}{r\left(\dfrac{1}{r} + \dfrac{1}{r'}\right)}$, $i' = \dfrac{I}{r'\left(\dfrac{1}{r} + \dfrac{1}{r'}\right)}$, d'où $i = \dfrac{Ir'}{r + r'}$ et $i' = \dfrac{Ir}{r + r'}$

$$\frac{1}{r_1} = \frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \quad \text{et} \quad r_1 = \frac{rr'}{r + r'} \qquad I = \frac{E}{R + \dfrac{rr'}{r + r'}}.$$

700. Réseau de conducteurs. — Si le circuit forme un réseau complexe, l'intensité du courant dans les différentes branches se calcule en appliquant deux règles, déduites de la loi d'Ohm, dues à *Kirchhoff.*

1° ***En un point de concours de plusieurs branches***, la somme algébrique des intensités est nulle. On compte positivement les intensités des courants qui convergent en O et négativement les intensités des courants divergents. On a $i = i' + i'' + i'''$ ou $\Sigma i = 0$ (fig. 827).

2° ***Pour un contour fermé quelconque*** (fig. 828) pris dans le réseau, on écrit $\Sigma ir = \Sigma e$. On appelle i l'intensité du courant dans une branche, r la résistance de cette branche, e une force électromotrice localisée dans cette branche. On compte les ir et les e *positivement* si les courants circulent *dans le sens dans lequel on suit le contour* (par exemple, sens de la

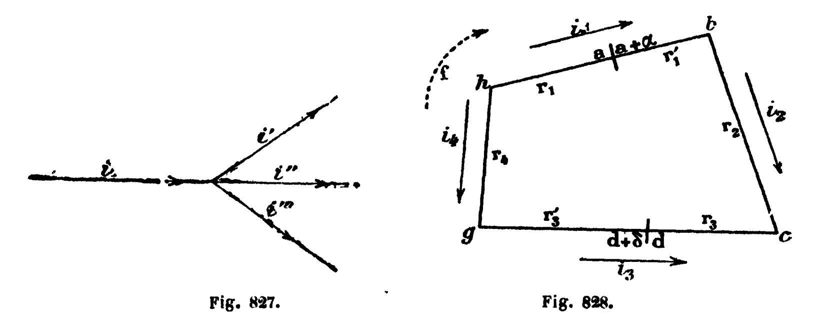


Fig. 827. Fig. 828.

flèche f) et si les forces électromotrices prises isolément donnent des courants dans ce même sens.

En appliquant la loi d'Ohm à chacun des segments du contour, on écrit :

$$\begin{array}{lcl} i_1 r_1 = h - a & & i_1 r_1 = h - a \\ i_1 r'_1 = a + \alpha - b & & i_1 r'_1 = a + \alpha - b \\ i_2 r_2 = b - c & \text{ou} & i_2 r_2 = b - c \\ i_3 r_3 = d - c & & -i_3 r_3 = c - d \\ i_3 r'_3 = g - d - \delta & & -i_3 r'_3 = d + \delta - g \\ i_4 r_4 = h - g & & -i_4 r_4 = g - h \end{array}
\quad \text{ou} \quad
\begin{array}{l} i_1 (r + r'_1) = h + \alpha - b \\ i_2 r_2 = b - c \\ -i_3 (r_3 + r'_3) = c + \delta - g \\ -i_4 r_4 = g - h \\ \hline \Sigma ir = \alpha + \delta = \Sigma \varepsilon. \end{array}$$

Si le contour ne renferme pas de force électromotrice, $\Sigma ir = 0$.

Pont de Wheatstone. — On appelle ainsi une disposition souvent employée pour comparer des résistances.

Entre deux points A et B d'un circuit parcouru par un courant, le courant se bifurque (fig. 829) en deux conducteurs ACB, ADB.

Le long de chacun de ces conducteurs le potentiel décroît de a à b, et il y a sur ces deux conducteurs, une infinité de paires de points, tels que C et D, *qui ont un même potentiel*. Par un *pont* jeté entre deux points

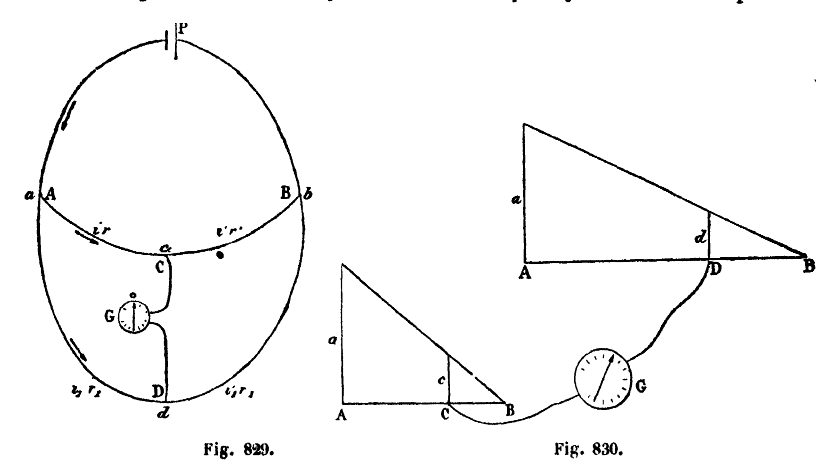


Fig. 829. Fig. 830.

C et D au même potentiel, il ne passe aucun courant (fig. 830). Le courant, d'intensité i dans la branche AC, conserve alors cette intensité i dans la branche CD, l'intensité i_1 est également la même en AD et DB.

Désignons par a, b, c, d, les potentiels respectifs en A, B, C, D et appliquons la loi d'Ohm aux quatre branches AC et CB, AD et DB :

$$ir = a - c \qquad ir' = c - b$$
$$i_1 r_1 = a - d \qquad i_1 r'_1 = d - b$$

puisque $c = d$, on a $ir = i_1 r_1$ et $ir' = i_1 r_1'$.

En divisant les deux équations membre à membre, il vient $\frac{r}{r'} = \frac{r_1}{r'_1}$.

On aurait pu appliquer les règles de Kirchhoff :

1° en A et en B : $I = i + i_1 = i' + i'_1$; en C : $i = i' + i_0$.

2° Sur le contour ACDA $ir + i_0 r_0 - i_1 r_1 = 0$.

Sur le contour CBDC $i'r' - i'_1 r'_1 - i_0 r_0 = 0$.

Quand l'intensité i_0 est nulle dans le pont, les équations se simplifient :

$$i = i', \qquad i_1 = i'_1; \qquad ir = i_1 r_1 \qquad \text{et } ir' = i_1 r'_1.$$

Si les deux résistances r' et r'_1 ont été choisies égales, on aura $r = r_1$, lorsque l'aiguille du galvanomètre restera au zéro dans le pont.

La comparaison des résistances par le pont de Wheatstone *n'exige pas la constance du courant de la pile*.

On forme deux branches avec des résistances égales r' et r'_1, puis on introduit dans les deux autres : la résistance r à évaluer et une boîte de résistances r_1 (fig. 831). On enlève graduellement les chevilles de cette boîte de résistances jusqu'à ce que la déviation du galvanomètre placé dans le pont CD soit inappréciable; la résistance r est alors le nombre

r_1 d'ohms introduits, lus sur la boîte. Un interrupteur à manette I, permet d'interrompre le courant pendant les tâtonnements du réglage.

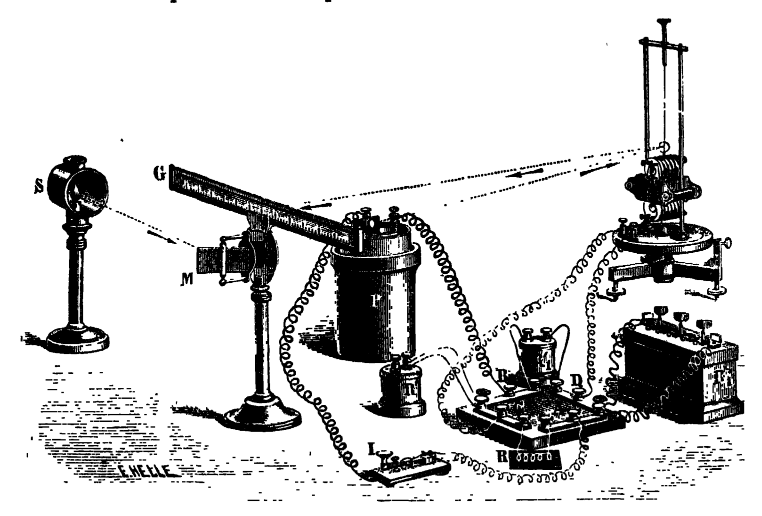


Fig. 831.

Pour déterminer une résistance spécifique, on évalue en ohms la résistance r d'un échantillon dont on a mesuré la longueur et la section, on déduit ensuite la résistance spécifique ρ de l'équation $r = \rho \frac{l}{s}$.

Pont de Wheatstone hydraulique (fig. 832). — Les analogies hydrauliques donnent une image de la circulation dans le pont de Wheatstone.

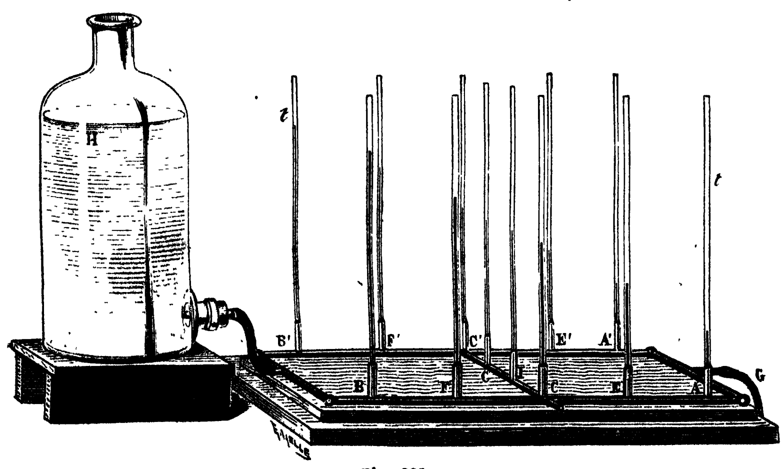


Fig. 832.

A la pile correspond un réservoir contenant de l'eau à un niveau H; les quatre branches entre lesquelles le courant se partage sont rem-

placées par quatre tuyaux portant des tubes *t* indicateurs de niveau; le pont est un tuyau transversal CC′ réunissant deux points C et C′ où le niveau est le même. Les niveaux, le long de BFCEA, forment une droite, il en est de même le long de B′F′C′E′A′; si les quatre branches sont égales, l'inclinaison de ces deux droites est la même. Sur le tuyau transversal CC′, qui figure le pont, les tubes indicateurs G et I, marquent le même niveau qu'en C et C′, car aucun courant n'y circule.

701. Détermination des constantes d'une pile. — La *force électromotrice* d'un élément de pile, en volts, et sa *résistance intérieure,* en ohms, s'appellent les constantes de l'élément.

Mesure de la force électromotrice. — On détermine la différence de potentiel des deux pôles, *à circuit ouvert,* avec un électromètre à quadrants, ou *à circuit fermé,* avec un voltmètre. La force électromotrice ne dépend ni des dimensions de l'élément, ni de sa résistance; elle dépend surtout de la nature des métaux.

Mesure de la résistance intérieure. — La résistance d'un élément de pile diminue quand ses dimensions augmentent; elle est d'autant plus petite que les surfaces plongées sont plus larges et que l'épaisseur des liquides interposés est plus réduite.

Un élément de force électromotrice E, étant fermé sur une résistance extérieure r, on détermine sa résistance intérieure λ, pendant son fonctionnement, en mesurant avec un électromètre à quadrants ou avec un voltmètre : 1° la différence de potentiel E′ aux deux pôles; 2° la différence de potentiel e_1 aux extrémités d'une résistance connue r_1 qui fait partie de la résistance extérieure r.

$$\text{On écrit} \quad I(\lambda + r) = E, \quad Ir = E', \quad I r_1 = e_1$$

$$\text{d'où} \quad I\lambda = E - E' \quad \text{et} \quad \frac{\lambda}{r_1} = \frac{E - E'}{e_1}$$

EFFETS CALORIFIQUES DES COURANTS

702. Les courants électriques élèvent la température des conducteurs qu'ils traversent (1). Un fil de fer tendu entre les deux pôles d'une forte pile s'échauffe et rougit; il fond et brûle s'il est assez fin et assez court.

Expériences de Joule. — Joule fit plonger dans un calorimètre, contenant un poids d'eau connu, un fil métallique S enroulé

(1) La résistance qu'un tube oppose à un courant d'eau provient de frottements entre les parois et l'eau en mouvement. La chaleur développée dans un circuit de courant électrique est peut-être aussi due à un frottement matériel.

en spirale et traversé par un courant constant (fig. 833). La chaleur gagnée par le calorimètre ne provenait que de la chaleur dégagée par le courant *dans le fil.* On évitait, en effet, des dérivations du courant dans le liquide en choisissant un liquide mauvais conducteur : l'eau distillée, ou l'essence de térébenthine.

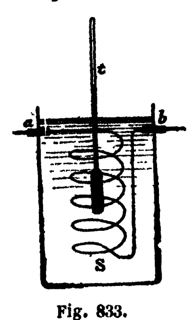


Fig. 833.

La chaleur dégagée est égale au produit de l'élévation de température du calorimètre par la capacité calorifique de tout ce qui s'échauffe (laiton du calorimètre, fil, thermomètre) (1).

Loi de Joule. — La chaleur dégagée dans un conducteur est *indépendante du sens du courant, proportionnelle à la durée du passage.* Pour même conducteur et des intensités successives différentes, elle est *proportionnelle au carré de l'intensité.* Pour différents conducteurs parcourus par un même courant, elle est *proportionnelle à leurs résistances respectives.*

D'après cela, pendant un temps t, un courant d'intensité I dégage, dans un conducteur de résistance r qu'il parcourt, un nombre q de calories proportionnel à I^2rt. Le travail équivalent à la chaleur dégagée est $4{,}18q$ en joules. On écrit $4{,}18q = KI^2rt$.

La différence de potentiel entre les extrémités du conducteur de résistance r étant e, la loi d'Ohm donne $Ir = e$; d'autre part $It = M$, où M désigne la quantité d'électricité qui a traversé chaque section du circuit pendant le temps t. On aura :

$$4{,}18\,q = KI^2rt = K\,\frac{e^2}{r}\,t = KeIt = KeM.$$

Définition du Volt. — L'unité de travail étant le joule et l'unité de quantité d'électricité étant le coulomb, on a choisi l'unité de différence de potentiel, appelée volt, de façon à rendre égal à l'unité le coefficient K dans l'équation $4{,}18\,q = KeM$.

Si, lorsque $M = 1$ et $K = 1$, on a $e = 1$ pour $4{,}18\,q = 1$ joule, l'unité de différence de potentiel ou le *volt, est la chute de potentiel qu'un conducteur doit présenter à ses extrémités pour que le passage d'un coulomb y développe un travail d'un joule.*

---

(1) La correction de refroidissement est évitée par une méthode *de compensation.* La température ambiante étant désignée par τ, on prend le calorimètre et son contenu à une température $\tau - \theta$ (θ égal à 2° ou 3°), et on fait passer le courant dans le fil jusqu'à ce que la température du calorimètre se soit élevée à $\tau + \theta$. Pour un courant constant, la chaleur dégagée est proportionnelle à la durée de l'expérience, il faut *le même temps* au calorimètre pour s'élever de $\tau - \theta$ à τ que pour passer de τ à $\tau + \theta$. Le réchauffement de la 1re période compense alors le refroidissement de la 2e.

703. Travail développé dans le circuit entier. — La loi de l'échauffement par le courant se vérifie pour tous les conducteurs liquides ou solides (1). Si r, r'... désignent les résistances des différents conducteurs d'un circuit, R la résistance totale, Q la chaleur totale dégagée dans un temps t, on peut écrire :

$$4{,}18Q = I^2rt + I^2r't + \dots = I^2(r + r' + \dots)\,t = I^2Rt = EIt = EM,$$

d'après $IR = E$ et $It = M$. Donc, en un temps t : *le travail* (évalué en joules) *développé dans tout le circuit est égal au produit* EM *de la force électromotrice* E *de la pile* (en volts) *par le nombre* M *de coulombs qui ont traversé le circuit.*

Pour un passage d'un *coulomb* dans son circuit, le travail en *joules* que développe une pile est exprimé par le même nombre que la force électromotrice de la pile en *volts*.

Par seconde, le travail développé dans le circuit est EI (produit de volts par des ampères), c'est la *puissance de la pile* exprimée *en watts.* Entre deux points pour lesquels la différence de potentiel est e, la puissance est eI.

Industriellement, un travail électrique, évalué en joules, est exprimé par de très grands nombres, aussi emploie-t-on pour l'exprimer, des unités multiples du joule, le *watt-heure* égal à 3600 joules et l'*hectowatt-heure* égal à 360 000 joules.

704. Distribution de la chaleur dans un circuit. — Sur un même circuit, les quantités de chaleur I^2rt et $I^2r't$, dégagées dans deux résistances r et r', étant proportionnelles à r et r', *la chaleur totale dégagée dans un circuit se répartit proportionnellement aux résistances des conducteurs* (2). En augmentant la résistance relative d'une portion du circuit, on y *localise* les effets calorifiques.

A égalité de longueur et de diamètre, un fil métallique est d'autant plus échauffé par un courant que sa résistance spécifique est plus grande. Si l'on transmet un courant à travers un conducteur formé de chaînons égaux, *alternativement en argent et en platine* (fig. 834), les chaînons de platine peuvent être portés au rouge alors que les chaînons d'argent, moins résistants, restent sombres.

Le cuivre étant celui des conducteurs usuels dont la résistance spécifique est la plus faible, de *gros fils de cuivre* n'offrent qu'une résistance négligeable et ne s'échauffent que très peu.

---

(1) Si l'on mesure en calories du gramme la chaleur q dégagée en t secondes, dans un conducteur de r ohms parcouru par un courant de I ampères, on aura $Jq = I^2rt$, on en déduit $J = 4{,}18$; c'est une *détermination de l'équivalent mécanique de la calorie.*

(2) Il en est de même pour la chaleur dégagée dans le circuit d'une décharge électrostatique.

Pour une même intensité du courant, *un fil fin s'échauffe plus*, à

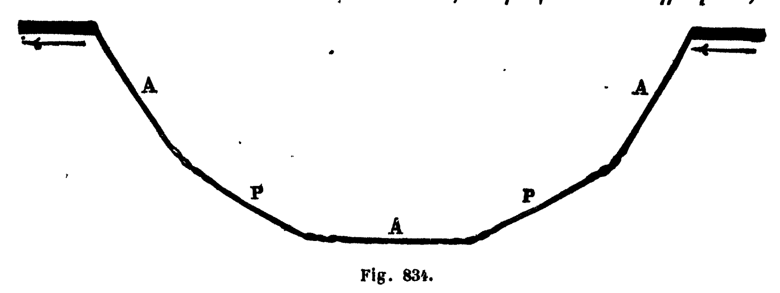


Fig. 834.

longueur égale, qu'un gros fil de même substance : 1° parce que la chaleur dégagée y est plus forte (la résistance variant en raison inverse de la section) ; 2° parce que son poids étant moindre, sa capacité calorifique est plus faible, ce qui détermine une température plus élevée pour une même production de chaleur.

L'élévation de température θ d'un fil de longueur l, de rayon r et de résistance spécifique ρ, s'obtient en égalant la chaleur rayonnée par seconde à la chaleur développée dans le fil pendant le même temps :

$$4{,}18.h.2\pi rl\theta = I^2\rho \frac{l}{\pi r^2}; \quad h \text{ est le pouvoir émissif du fil.}$$

Un fil de cuivre supporte 6 amp. par mm², sans échauffement excessif.

705. Chaleur perdue dans la pile. — La chaleur dégagée dans un circuit par un courant comprend deux parties : 1° la chaleur développée dans le circuit extérieur et utilisable ; 2° la chaleur retenue par la pile ; celle-ci est dépensée en pure perte.

La répartition de la chaleur dans le circuit total étant proportionnelle aux résistances, si la résistance extérieure est négligeable, la chaleur est entièrement retenue par la pile ; au contraire, elle se dégage entièrement dans le circuit extérieur si la résistance de la pile est très petite. La résistance d'une pile diminuant quand les dimensions de ses éléments augmentent, on produit des effets calorifiques *intenses* dans des fils métalliques de résistance faible, en groupant les éléments en batterie ou en employant des accumulateurs.

706. Puissance maximum. — Le seul travail utilisable d'une pile est celui qui est développé dans son circuit extérieur.

Appelons E la force électromotrice de la pile, λ sa résistance intérieure, I l'intensité du courant et E′ la différence de potentiel aux bornes de la pile à circuit fermé. E′ est la chute de potentiel due à la résistance extérieure r, tandis que E — E′ est la chute relative à la résistance λ.

L'énergie totale développée par seconde dans le circuit est EI, *l'énergie utilisable* est E′I, l'énergie retenue par la pile (E — E′)I.

Appliquée au circuit entier et à sa portion extérieure, la loi d'Ohm donne : $I = \frac{E}{\lambda + r} = \frac{E'}{r}$. Pour la pile seule, $I = \frac{E - E'}{\lambda}$.

$$\text{De là } E'I = \frac{E'(E - E')}{\lambda}.$$

Pour une pile déterminée, le dénominateur est invariable.

La somme $E' + E - E'$ étant constante, le produit $E'(E - E')$ est maximum quand $E' = E - E'$, ou $E' = \frac{E}{2}$.

D'après la relation $I = \frac{E'}{r}$, lorsque $E' = \frac{E}{2}$, on a $I = \frac{E}{2r}$.

Le *maximum de puissance ou de travail utilisable par seconde* correspond donc à une intensité $I = \frac{E}{2r}$; dans ce cas, $\lambda = r$, *ou la résistance extérieure est égale à la résistance intérieure.*

Le **rendement** ou la *fraction utilisable de l'énergie* est $\frac{E'I}{EI}$ ou $\frac{E'}{E}$; il est d'autant plus voisin de l'unité que l'intensité est plus petite, puisque l'intensité diminue à mesure que E' se rapproche de E. Le rendement est $\frac{1}{2}$ lorsque $E' = \frac{E}{2}$ ou quand la puissance de la pile est maximum. Le rendement est nul quand la pile est en court circuit ou fermée par un gros fil de cuivre, car alors E' est nul.

707. Applications des effets calorifiques du courant. — Ces applications sont basées sur la *localisation* des effets calorifiques dans un circuit traversé par un courant. L'incandescence de fils fins de platine est utilisée en chirurgie (*galvanocautères*).

Dans l'éclairage par *incandescence*, de fins filaments conducteurs sont traversés par un courant et portés, dans le vide, à une température assez élevée pour les rendre lumineux.

Dans le *chauffage* électrique, des conducteurs résistants d'alliages divers s'échauffent par un courant et rayonnent de la chaleur, soit à l'air libre, soit dans des enveloppes appropriées (radiateurs, chauffe-pieds, tissus chauffants, fourneaux).

Citons encore les *coupe-circuits*, formés d'un fil fin de plomb de quelques cm. de longueur qui fond et interrompt le courant quand l'intensité dépasse la valeur que permet la section du fil.

708. Analogie hydraulique. — L'analogie hydraulique se poursuit dans le travail électrique. De même qu'un liquide de poids P réalise un travail HP, en tombant d'une hauteur H ; de même, une charge électrique M produit un travail EM en tombant d'un potentiel E. Les analogies peuvent être développées.

Énergie hydraulique. — La nappe d'eau d'un lac ne possède par

elle-même aucune énergie. Si on l'élève à une certaine hauteur en dépensant un travail mécanique, le travail dépensé passe à l'état d'énergie potentielle que l'eau soulevée restitue dans sa chute. Cette énergie peut être utilisée loin du lac où sont établies les pompes élévatrices : on la fait écouler en pente douce jusqu'à une station où elle tombe à pente rapide pour effectuer un travail. De là elle descend lentement jusqu'à la nappe de départ, où les pompes l'élèvent de nouveau. L'eau a parcouru un circuit fermé.

Énergie électrique. — Comme l'eau d'un lac en repos, l'électricité en équilibre sur des conducteurs ne possède par elle-même aucune énergie. Des machines électriques ou des piles élèvent l'électricité à un certain niveau (potentiel) comme une pompe élève l'eau. Une masse électrique, élevée à un potentiel supérieur au potentiel du sol, peut s'écouler en pente douce le long d'un conducteur peu résistant, jusqu'à ce qu'on la laisse tomber à pente rapide. L'écoulement de l'électricité détermine un courant électrique, sa chute produit le travail du courant. Quand l'électricité est revenue en pente douce à son point de départ, la machine électrique l'élève de nouveau. L'électricité a parcouru un circuit fermé.

EFFETS CHIMIQUES DU COURANT

709. Électrolyse. — Les conducteurs métalliques solides n'éprouvent aucune modification chimique par le passage du courant électrique; il en est de même du mercure et des métaux fondus; les autres liquides sont décomposés *lorsque le courant les traverse* (1). La décomposition par le courant est nommée **électrolyse**. La substance décomposée est un **électrolyte** (2).

Les **électrodes** sont des plaques conductrices qui plongent dans le liquide et servent au passage du courant. L'électrode reliée au pôle positif est dite électrode *positive* ou **anode**, l'électrode reliée au pôle négatif est dite électrode *négative* ou **cathode**.

Dans toute électrolyse, les *produits de la décomposition n'apparaissent qu'aux électrodes* et non dans le sein de l'électrolyte.

(1) Les corps qui ne sont ni acides, ni bases, ni sels, ne sont ni traversés, ni décomposés par le courant, tels sont : l'eau pure, l'alcool, l'essence de térébenthine, l'éther, etc., les solutions dans l'eau de nombreux composés organiques : alcools, éthers, sucres, etc...

(2) Les *électrolytes* se distinguent des *non-électrolytes* dans les phénomènes de cryoscopie, d'ébullioscopie, de pression osmotique.

Décomposition de l'eau. — La décomposition de l'eau se fait dans un **voltamètre**. C'est un vase de verre dont le fond est traversé

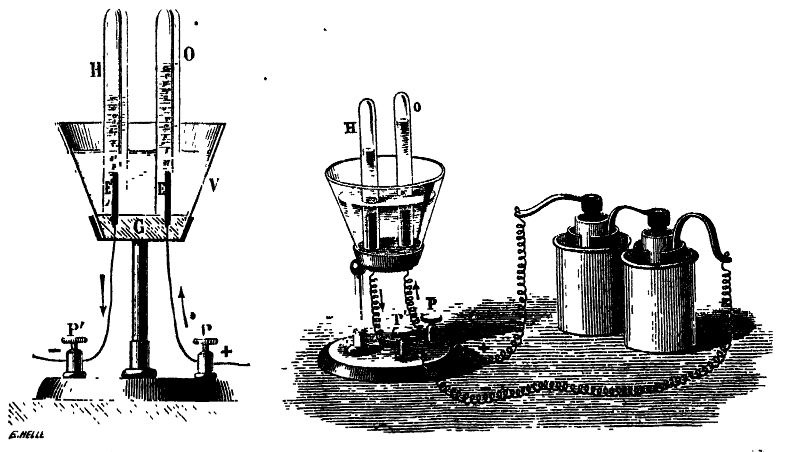


Fig. 835. Fig. 836.

par deux lames de platine E et E′ fixées dans un mastic isolant G et reliées par des fils métalliques à deux bornes P et P′ (fig. 835). On verse dans le vase de l'eau acidulée avec de l'acide sulfurique et on recouvre chacune des lames d'une éprouvette pleine du même liquide. On met en communication les bornes P et P′ avec les deux pôles d'une pile (fig. 836). Dès que le circuit est fermé, des bulles de gaz se dégagent sur les deux électrodes et gagnent le haut des éprouvettes. Ce sont les éléments de l'eau : l'*hydrogène* (gaz combustible brûlant avec une flamme pâle) se dégage exclusivement à l'électrode négative; l'*oxygène* (gaz non combustible, rallumant une allumette qui a encore un point en ignition) se dégage à l'électrode positive. Le volume de l'hydrogène est *double* de celui de l'oxygène. Le dégagement cesse si l'on interrompt le courant, il reprend si le circuit est de nouveau fermé.

Décomposition des sels métalliques. — *Composés binaires.* — Les oxydes, chlorures, sulfures.., sont décomposés par le courant. Le métalloïde se rend à l'électrode positive, le métal à l'électrode négative. C'est ainsi que sont décomposés les chlorures métalliques *rendus conducteurs* par fusion ou leurs solutions aqueuses; ils donnent du chlore à l'électrode positive, du métal à l'électrode négative; dans ce cas, on prend pour électrode positive une électrode de charbon, que le chlore n'attaque pas.

Sels oxygénés. — Choisissons le sulfate de cuivre SO^4Cu. Dans

un tube à deux branches (fig. 837), on verse une dissolution du sulfate et on plonge dans chaque branche une lame de platine communiquant avec l'un des pôles d'une pile. L'électrode négative B se recouvre d'un enduit rouge de cuivre; le groupement SO^4 se rend à l'électrode positive A.

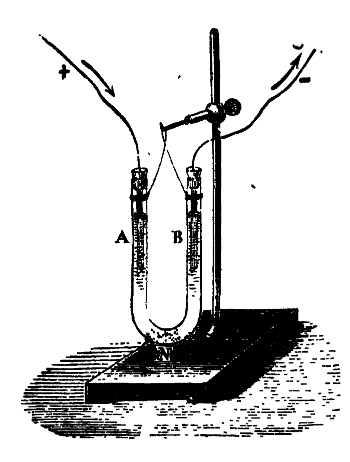


Fig. 837.

La décomposition des composés binaires métalliques et celle des sels oxygénés sont comprises dans un même énoncé en regardant ces différents corps comme formés d'un *métal* qui est uni, soit à un radical métalloïde Cl, Br, I, O, S... soit à un radical acide SO^4, AzO^3... *Le métal se rend seul à l'électrode négative;* les autres parties constituantes du composé ou *le radical,* vont *à l'électrode positive.*

LOIS DE L'ÉLECTROLYSE

710. I. Lorsque plusieurs appareils à décomposition, contenant tous le même électrolyte, se suivent en série dans un circuit, *la masse de l'électrolyte décomposé dans chacun d'eux est la même en un même temps* (1). Avec des voltamètres à eau, on a dans tous le même volume d'hydrogène dégagé (**684**) ; dans des voltamètres à azotate d'argent, le même poids d'argent est déposé.

II. Pour un même électrolyte, *la masse décomposée est proportionnelle à la quantité d'électricité* qui a traversé l'électrolyte; si le courant est constant, *la masse décomposée est proportionnelle à l'intensité du courant* et à la durée de son passage (2).

III. Dans le dédoublement d'un composé par l'électrolyse, *une même quantité d'électricité,* égale à 96 600 coulombs, sépare une

(1) Les appareils à décomposition peuvent différer par l'écartement et la surface des électrodes, par la conductibilité du liquide. Intercalés séparément et *successivement* dans un même circuit, ils diminueraient inégalement l'intensité du courant et des masses différentes de l'électrolyte seraient décomposées.

(2) Rappelons (**684**) que si l'on bifurque un circuit en formant de A en A' deux dérivations (fig. 810) et si l'on introduit trois voltamètres, l'un en V dans le circuit principal et les deux autres V' et V'' identiques dans les dérivations, les masses décomposées V' et V'' sont les mêmes et égales à la moitié de la masse décomposée en V.

masse de chacun des deux composants *égale à son équivalent chimique*, en grammes. L'équivalent chimique est la fraction du poids atomique qui peut se substituer ou se combiner à un atome monovalent ou, c'est le quotient du poids atomique par la valence [1]. Les poids atomiques sont exprimés en grammes et rapportés au poids atomique de l'hydrogène qui est pris égal à un gramme ; H = 1.

H, K, Ag sont *monovalents* comme Cl et AzO^3 ; H^2, K^2, Ag^2, Cu, Mg sont *bivalents* comme SO^4 ; Au est *trivalent* comme Cl^3 ; Pt est *tétravalent* comme Cl^4.

Ag et AzO^3 sont liés par une valence ; Cu et SO^4 par deux, etc.

En traversant plusieurs électrolytes, *une même quantité d'électricité* rompt dans tous *le même nombre de valences*. 96 600 coulombs rompent une valence dans un électrolyte quelconque.

Il faut 96 600 coulombs pour décomposer des masses égales à :

$$KCl, \quad AgAzO^3, \quad \frac{1}{2}H^2O, \quad \frac{1}{2}MgCl^2 \quad \frac{1}{3}AuCl^3 \quad \frac{1}{4}PtCl^4.$$

Cette quantité d'électricité met en liberté :

$$K \text{ et } Cl, \quad Ag \text{ et } AzO^3, \quad H \text{ et } O^{\frac{1}{2}} \quad \frac{1}{2}Mg \text{ et } Cl, \quad \frac{1}{3}Au \text{ et } Cl, \quad \frac{1}{4}Pt \text{ et } Cl.$$

La masse séparée est proportionnelle à la quantité d'électricité qui a traversé l'électrolyte, on la représente par εIt, ε étant la masse mise en liberté par un coulomb ou par un ampère en une seconde.

Puisque 96 600 coulombs mettent en liberté 1 gr. d'hydrogène, ε est $\frac{1}{96\,600}$ pour l'hydrogène, $\frac{63}{2.96600}$ pour le cuivre, $\frac{108}{96\,600}$ ou $0^{gr}001118$ pour l'argent [2].

711. Mesure d'une intensité ou d'une quantité d'électricité par l'électrolyse. — Si, dans un voltamètre à eau, un courant d'intensité I dégage p gr. d'hydrogène en t sec. on a :

$$p = \varepsilon It = \varepsilon M, \quad \text{d'où } I = \frac{p}{\varepsilon t} = \frac{p\ 96600}{t}, \quad M = \frac{p}{\varepsilon} = p.96600.$$

Ce courant dépose p' gr. d'argent dans un voltamètre à azotate d'argent [3]. On a, en appelant ε' l'équivalent électrochimique de l'argent :

(1) Les atomes n'ont pas tous la même valeur chimique. On appelle *valence* d'un atome le nombre d'atomes d'hydrogène qu'il peut fixer (si c'est un radical) ou auquel il peut se substituer (si c'est un métal). L'hydrogène, le chlore, le sodium ont des atomes *monovalents*, l'oxygène, le cuivre ont des atomes *bivalents*.

(2) L'équivalent électrochimique d'un corps de poids atomique A et de valence n est le produit de $\frac{A}{n}$ par l'équivalent électrochimique de l'hydrogène.

(3) On préfère l'azotate d'argent parce qu'il faut choisir un métal bien adhérent à la cathode, avoir une liqueur exempte d'acide et se servir d'une anode parfaitement attaquable par le radical acide.

$$p' = \varepsilon' It = \varepsilon' M, \quad \text{d'où } I = \frac{p'}{\varepsilon' t} = \frac{p'\,96600}{108 t}, \quad M = \frac{p'}{\varepsilon'} = \frac{p'.96600}{108}.$$

Avec une machine électrostatique, l'électrolyse est extrêmement lente en raison de la très faible intensité du courant.

712. Effets chimiques dans la pile. — Le courant électrolyse les liquides qu'il traverse, dans les éléments de la pile, *comme dans les voltamètres extérieurs.*

Dans le cas d'éléments formés d'une lame de zinc et d'une lame de platine plongeant dans de l'eau acidulée, il se produit dans chaque élément une électrolyse de l'eau à circuit fermé : H^2 se dégage sur le platine, SO^4 se porte sur le zinc et le transforme en sulfate.

Avec des éléments en série, la dépense de zinc est la même dans tous, elle est *proportionnelle au nombre* des éléments. Avec 10 éléments, il y a 10.33 gr. de zinc dissous pour 1 gr. d'hydrogène qui serait dégagé dans un voltamètre extérieur.

En résumé, dans toute décomposition, à l'intérieur comme à l'extérieur de la pile, l'*hydrogène* et les *métaux* suivent le courant, c'est-à-dire se portent à la **cathode** ou *électrode de sortie* (négative dans le voltamètre, positive dans l'élément); l'oxygène et les radicaux acides vont à l'**anode** ou *électrode d'entrée.*

ACTIONS SECONDAIRES

713. Les produits d'une électrolyse exercent souvent sur les électrodes ou sur l'électrolyte, ou entre eux, des actions *secondaires.*

Décomposition du sulfate de cuivre. — Dans la décomposition du sulfate de cuivre entre des électrodes de platine, le radical SO^4 isolé à l'anode se complète aux dépens de l'eau, à laquelle il emprunte H^2 pour former SO^4H^2, tandis que l'oxygène de l'eau se dégage.

Si le métal de l'anode est du cuivre, c'est en se combinant au cuivre et en reformant du sulfate que SO^4 se complète; il n'y a plus alors de dégagement d'oxygène, le cuivre de l'anode, dite **anode soluble,** se dissout en quantité égale au cuivre déposé à la cathode.

Décomposition d'un sulfate alcalin. — Dans la décomposition d'une solution de sulfate de sodium dans un tube en U entre des électrodes de platine, SO^4 se rend à l'anode et Na^2 à la cathode.

A l'anode, SO^4 se complète en prenant H^2 à l'eau pour former de l'*acide sulfurique* et dégage O. A la cathode, Na^2 décompose aussi l'eau en lui prenant O pour former de la *soude* et dégage H^2.

En définitive, de l'*acide sulfurique* apparaît à l'anode et de la

soude à la cathode. Si l'on a versé du tournesol rose dans chaque branche du tube en U, le tournesol rougit autour de l'anode et bleuit autour de la cathode.

La décomposition a lieu réellement en SO^4 et Na^2 comme pour un sulfate métallique; pour le démontrer, on fait plonger dans une solution de sulfate de sodium un tube recourbé B contenant du mercure auquel aboutit une cathode de platine (fig. 838). L'anode est une lame de platine A. Le sodium mis en liberté forme en B avec le mercure un amalgame dont on sépare le sodium par distillation dans un courant de gaz inerte.

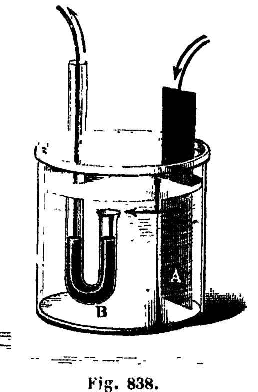


Fig. 838.

Décomposition de l'eau acidulée sulfurique. — Il y a décomposition de SO^4H^2 en H^2 à la cathode et SO^4 à l'anode. Par une action secondaire, SO^4 se complète à l'anode en empruntant H^2 à l'eau et en dégageant O. Il y a ainsi décomposition *apparente* de l'eau en H^2 à la cathode et O à l'anode.

Il se forme de l'*ozone* à l'anode, surtout si l'eau est fortement acidulée et refroidie. Il s'y forme aussi du *bioxyde d'hydrogène* et de l'acide *persulfurique*. Certains métaux, servant de cathode, absorbent de l'hydrogène; le *platine* peut en absorber 80 fois et le *palladium* 900 fois son volume.

Soupape électrolytique. — Quand un courant traverse une dissolution d'un sel oxygéné entre une *anode en aluminium* et une cathode en fer, l'oxygène dégagé sur l'anode forme de l'alumine très résistante et le courant est interrompu. Cette observation a été utilisée pour employer des courants alternatifs à charger des accumulateurs.

POLARISATION D'UN VOLTAMÈTRE

714. Quand un voltamètre V est traversé par le courant d'une pile E, de l'hydrogène se dégage à l'électrode négative N, de l'oxygène à l'électrode positive P (fig. 839). Si, à un certain moment, on intercepte en O la communication avec la pile, et si l'on réunit par O′, à un galvanomètre, les deux électrodes du voltamètre, le nouveau circuit PO′GN devient le siège d'un courant dit **secondaire**. Ce courant traverse le voltamètre en sens contraire du courant primitif de la pile, qui est dit **primaire**.

Le voltamètre a deux pôles comme un élément de pile, il est le siège d'une force électromotrice E′ due aux éléments dégagés

aux électrodes; les *électrodes du voltamètre sont dites polarisées.*

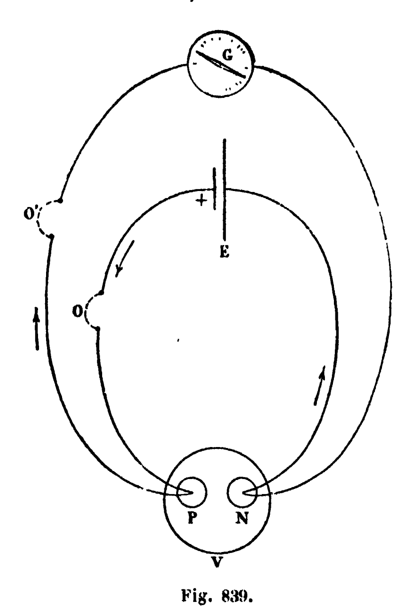


Fig. 839.

La force électromotrice E′ peut être mesurée avec un électromètre à quadrants ou avec un voltmètre.

La force électromotrice E′ d'un voltamètre est opposée à la force électromotrice E de la pile, elle s'en retranche *pendant le passage* du courant primaire. La force électromotrice efficace dans le circuit est donc E — E′ et l'intensité du courant a pour valeur:

$$I = \frac{E - E'}{R},$$

R étant la résistance totale du circuit (pile, voltamètre et fils).

715. Énergie électrique dépensée dans l'électrolyse. — On conçoit que la séparation des éléments d'un corps composé exige une dépense de travail. En effet, puisqu'un mélange d'hydrogène et d'oxygène possède une énergie potentielle qui disparaît dans la formation de l'eau, une dépense de travail est nécessaire pour régénérer cette énergie potentielle en séparant de nouveau les éléments de l'eau. Ce travail est fourni, pendant l'électrolyse, par le courant électrique.

On met l'équation $I = \frac{E - E'}{R}$ sous la forme $IR + E' = E$, d'où, en multipliant par It, $I^2Rt + E'It = EIt$;

It est la quantité d'électricité qui a traversé le circuit. I^2Rt est la chaleur dégagée par le courant dans les conducteurs pendant la durée de l'électrolyse; $E'It$ est le travail appliqué à produire l'électrolyse; EIt est la dépense totale d'énergie fournie par la pile pour produire les deux effets. Cette équation exprime la conservation de l'énergie.

716. Force électromotrice exigée par une électrolyse. — Le travail de décomposition d'un électrolyte est représenté par $E'It$.

Soit, d'autre part, q la chaleur de décomposition d'une molécule-gramme d'un corps monovalent; le travail de décomposition est en joules 4,18 q. Ce travail étant toujours produit par 96 600 coulombs, quel que soit l'électrolyte, la chute E′ varie avec q, puisqu'on a :

$$E' \, 96\,600 = 4{,}18\, q.$$

Dans le cas de l'eau, $q = 34\,500$, d'où $E' = \frac{4{,}18 . 34\,500}{96\,600} = 1^{v}{,}49.$

Il n'y a électrolyse que si la force électromotrice E du courant primaire st supérieure à E′. Ainsi, un seul élément Daniell ($E = 1^{v}{,}1$) ne peut

décomposer l'eau ($E' = 1^v,49$), mais un élément Bunsen suffit ($E = 1^v,9$).

Pendant le *passage du courant*, le liquide du voltamètre donne lieu, par sa résistance, à une chute de potentiel ir indépendante de E'. C'est la somme $E' + ir$ qu'indique un électromètre, lorsque les deux paires de quadrants communiquent avec les deux bornes du voltamètre pendant le passage du courant.

717. Résistance d'une solution saline. — Dans la décomposition d'un sel entre deux *électrodes de même métal que le sel*, le travail de décomposition du sel dissous est compensé par le travail inverse de dissolution de l'électrode soluble et le voltamètre se comporte comme une simple résistance; il n'y a pas de force électromotrice de polarisation. La

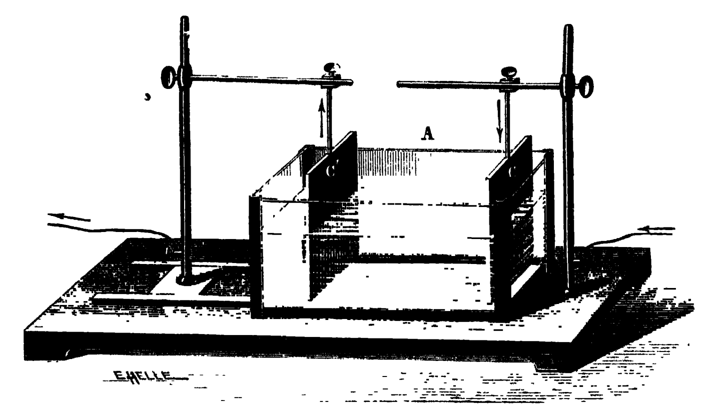


Fig. 840.

moindre force électromotrice produit alors la décomposition; la solution conserve sa richesse, le métal dissous à l'électrode positive a le même poids que le métal déposé à l'électrode négative (**713**).

La résistance r d'une *solution saline*, entre deux *électrodes* C et C' *de même métal* que le sel, s'obtient par les méthodes employées pour les métaux. Si la solution est placée dans un vase prismatique A (fig. 840) de longueur et de section connues, la relation $r = \rho \frac{l}{s}$ donne la résistance spécifique ρ (résistance en ohms d'un cm^3 de la solution) (1).

718. Théorie de l'Électrolyse. — *Hypothèse* : Dans une dissolution, un certain nombre de molécules de la substance dissoute subissent une *dissociation*. En se dissociant, une molécule dissoute se dédouble en deux parties dont l'une est chargée d'électricité positive et l'autre, d'une quantité égale d'électricité négative. Ces deux parties sont appelées des *ions*; *les ions présentent des propriétés spéciales*.

---

(1) On peut mesurer la résistance d'un liquide quelconque par la méthode du pont de Wheatstone, en faisant usage de courants alternatifs rapides. Il n'y a pas alors de polarisation des électrodes. Le galvanomètre est remplacé par un téléphone dont le son est minimum quand l'équilibre est établi dans le pont.

Par exemple, une dissolution de chlorure de sodium renferme des molécules dissociées dont chacune fournit un ion chlore et un ion sodium ; ces ions, libres, indépendants les uns des autres, n'ont pas d'action sur les corps en présence. L'ion sodium n'attaque pas l'eau.

La dissociation est fonction de la concentration; elle est d'autant plus complète que la dissolution est plus étendue. Dans une dissolution de m molécules de chlorure de sodium dans l'eau, il y a m' molécules non dissociées et $m-m'$ dissociées en $m-m'$ ions chlore et $m-m'$ ions sodium. Le rapport $\delta = \frac{m-m'}{m}$ s'appelle le degré δ de dissociation.

Avec 58 gr. 5 de chlorure de sodium pour un litre d'eau (35,5 chlore et 23 sodium), on a $\delta = 0,65$; si l'on dilue au millième, $\delta = 0,98$.

Les ions ont la même valence que les atomes correspondants. — La charge électrique d'un ion est la même pour les ions de même valence. Un ion hydrogène pesant 1 gramme et un ion sodium pesant 23 grammes ont une même charge absolue de 96600 coulombs; leurs charges sont de signes contraires; ces deux ions sont monovalents. La charge d'un ion est proportionnelle à sa valence; un ion cuivre, qui est divalent, porte 2.96600 coulombs.

Action du courant électrique sur les ions. — Le courant ne sépare pas les ions; ils sont séparés avant son passage. L'électrolyse résulte d'une action électrique exercée sur les ions. Quand on établit une différence de potentiel entre deux électrodes, l'espace intermédiaire est un champ électrique, une force électrique attire les ions positifs vers la cathode et les ions négatifs vers l'anode.

Les ions sont les seuls véhicules de l'électricité; le dissolvant et les molécules non dissociées n'y prennent aucune part. Les ions forment deux cortèges de charges électriques qui cheminent en sens inverses, suivant les lignes de force. ***Au contact des électrodes, les ions sont déchargés*** et reprennent leurs propriétés physiques et chimiques habituelles, ce qui permet les actions secondaires.

Par l'intermédiaire des ions, il arrive autant d'électricité positive à la cathode que d'électricité négative à l'anode. Le courant est alimenté, en dehors de l'électrolyte, par les charges cédées aux électrodes.

Les ions qui ont disparu de la dissolution par l'électrolyse sont, à mesure, remplacés par d'autres qui proviennent de nouvelles molécules dissociées. La conservation de la richesse en ions est indispensable pour l'équilibre de la dissolution.

L'ionisation est nécessaire pour la conductibilité électrique d'un électrolyte. — Les corps non électrolysables sont ceux qui ne sont pas préalablement dissociés (1).

(1) La conductibilité d'une solution exige : 1° que le corps en dissolution puisse se décomposer en ions ; cette propriété se présente particulièrement chez les corps de constitution saline; 2° que le dissolvant favorise la séparation en ions des molécules neutres. Ce *pouvoir ionisant* est le plus grand pour l'eau ; viennent ensuite les alcools (surtout ceux dont le nombre d'atomes de carbone est faible), puis l'ammoniaque liquide, l'acide sulfureux liquide, etc.

APPLICATIONS DE L'ÉLECTROLYSE

719. Galvanoplastie. — Dans la galvanoplastie, on reproduit des modèles en déposant par électrolyse un métal sur un moule. Nous allons supposer qu'il s'agit de reproduire par un dépôt de cuivre le relief d'un objet (médaille, statue, etc.).

Préparation d'un moule. — Avec de la cire ou de la gutta-percha ramollie par la chaleur et appliquée avec pression, on forme un moule en creux du modèle à reproduire. On détache le moule après refroidissement, puis on le rend *conducteur* du courant, en l'enduisant, avec une brosse, d'une fine couche de plombagine.

Dépôt de cuivre sur le moule. — On suspend le moule M dans un bain saturé de *sulfate de cuivre* acidulé par de l'acide sulfurique; on le relie métalliquement (1) au pôle négatif d'une pile à courant constant; une large plaque de cuivre E, qui plonge dans le bain, communique avec le pôle positif de la pile (fig. 841). Le circuit étant fermé, le sulfate est décomposé : le cuivre se dépose à la *cathode* sur le moule et le recouvre dans ses détails, l'acide sulfurique et l'oxygène vont attaquer, sur l'*anode soluble* E, un poids de cuivre égal à celui du dépôt. Du cuivre est ainsi transporté de l'anode à la cathode. Il se forme du sulfate de cuivre qui se dissout et le bain reste saturé. La couche a une épaisseur proportionnelle à la durée du passage du courant; on détache le métal quand il est assez épais (2).

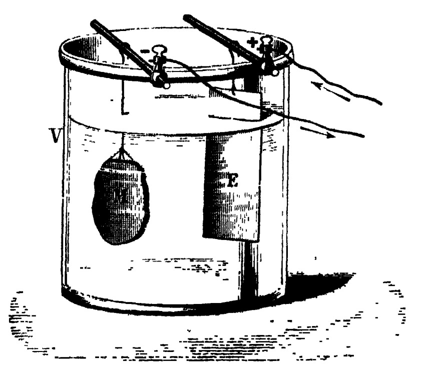


Fig. 841.

Appareil simple. — L'appareil simple est un élément Daniell. Dans une cuve en verre contenant une solution de sulfate de cuivre maintenue saturée par des cristaux, on place plusieurs vases poreux qui renferment chacun de l'eau acidulée et une lame de zinc. Les lames de zinc sont réunies par une tringle et forment le pôle négatif de la pile. Elles sont

(1) Autour du moule plombaginé est enroulé un cercle de cuivre, soutenu par un fil de cuivre. On enduit de cire ce qui ne doit pas être galvanisé.

(2) La densité du courant (ou l'intensité par centimètre carré de la cathode) ne doit pas dépasser quelques milliampères, sinon le dépôt est grenu et non adhérent.

reliées par un fil conducteur à une seconde tringle soutenant les moules plongés dans le sulfate de cuivre. Dans l'élément, le courant va du zinc au moule qui forme la *cathode* et sur laquelle le cuivre se dépose.

Applications industrielles de la galvanoplastie. — Les bois gravés ne supporteraient pas longtemps sans déformation la pression des tirages, ils servent de modèles à des reproductions galvaniques. Ces *clichés* sont résistants et l'on peut d'ailleurs les renouveler. Les clichés galvaniques servent pour le tirage des timbres-poste.

Dorure, argenture, nickelage. — On a recours à l'électrolyse pour déposer sur un métal une *mince* couche *adhérente* d'un *métal précieux* (or, argent) ou *peu oxydable* (nickel).

La pièce est d'abord soigneusement nettoyée pour que le métal se dépose également en tous les points; elle est ensuite *suspendue à la cathode dans un bain à réaction alcaline.* Pour la dorure ou l'argenture, ce bain est du cyanure d'or ou d'argent dissous dans du cyanure de potassium; pour le nickelage, c'est du sulfate double de nickel et d'ammonium. L'anode est une *électrode soluble* du métal à déposer.

Au sortir du bain, la pièce est mate; on lui donne du brillant par le *brunissage,* c'est-à-dire en la frottant avec une pierre d'agate arrondie, sertie dans un manche en bois.

L'argent n'adhérerait pas sur l'acier; pour argenter l'acier, on y dépose d'abord une couche adhérente de cuivre (avec un bain de cyanure de cuivre), puis on argente la surface du cuivre.

720. Électrochimie. — L'électrochimie a pour objet la préparation par électrolyse de différents corps simples ou composés.

Préparation des métaux. — Les alcalis et les oxydes terreux passèrent pour indécomposables jusqu'au moment où Davy appliqua le courant électrique à décomposer la potasse.

Pour répéter l'expérience de Davy, un fragment P de potasse *humide* est placé sur une lame de platine AB communiquant avec le pôle positif d'une forte pile (fig. 842); dans une cavité creusée à la partie supérieure de la potasse et contenant du mercure M, on plonge un fil de platine N relié au pôle négatif de la pile. Il se dégage de l'oxygène sur l'anode. A la cathode, le potassium forme avec le mercure un amalgame dont on extrait le *potassium* par distillation (dans un gaz inerte).

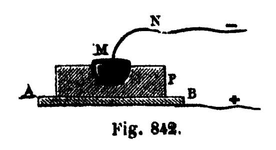


Fig. 842.

On obtient le *baryum*, le *calcium*, le *magnésium*, le *strontium*, en employant comme électrolytes les chlorures de ces métaux rendus

conducteurs par fusion et en y plongeant des électrodes de charbon.

L'*aluminium pur* s'obtient par l'électrolyse de l'alumine.

Pour obtenir du *cuivre pur*, recherché pour sa haute conductibilité électrique, on prend comme électrolyte un bain de sulfate de cuivre, comme anode une plaque de cuivre contenant plus de 95 pour cent de cuivre; *par l'électrolyse due au courant, le métal est transporté* sur une cathode formée d'une lame mince de cuivre pur. Les métaux étrangers tombent au fond du bain. On obtient ainsi de larges plaques de cuivre très pur.

L'électrolyse de l'*acide fluorhydrique*, rendu conducteur par du fluorhydrate de fluorure de potassium, a permis d'isoler le fluor.

Les applications industrielles de l'électrolyse se sont multipliées ; l'épuration des eaux par l'ozone, la préparation de la céruse, le tannage des peaux, le blanchiment des pâtes à papier, peuvent se faire par électrolyse. Citons encore les préparations de couleurs par électrolyse de composés liquides organiques, la rectification des alcools mauvais goût (1), etc.

CONSTRUCTION DES ÉLÉMENTS DE PILE

721. Zinc amalgamé. — Le zinc est le métal négatif usuel des piles. Mais le zinc commercial est attaqué par l'eau acidulée, *même à circuit ouvert;* il contient en effet des métaux tels que le plomb, l'arsenic, dont chaque grain, moins attaquable que le zinc, constitue une électrode positive vis-à-vis du zinc qui est une électrode négative. Il se forme ainsi des *couples locaux* au contact de l'eau acidulée. De là, une transformation d'énergie chimique, non utilisée dans le circuit extérieur et une usure de zinc en pure perte.

Le zinc amalgamé (2), *comme le zinc pur*, n'est pas attaqué, à circuit ouvert, par l'eau acidulée ; il ne se forme pas de couples locaux et *il ne se dégage pas d'hydrogène sur le zinc ;* il n'y a dépense de zinc qu'à circuit fermé.

722. Affaiblissement du courant d'un élément de Volta. — La déviation d'un galvanomètre placé dans le circuit

---

(1) On les transforme en alcools bon goût en les acidulant avec $\frac{1}{1000}$ d'acide sulfurique et en y faisant passer un courant entre des électrodes de platine.

(2) On amalgame le zinc en le décapant avec de l'eau acidulée et en le frottant ensuite avec du mercure. On renouvelle l'opération quand le zinc de la couche amalgamée a été dissous par le courant. Le mercure de l'amalgame tombe au fond de l'élément.

d'un élément de Volta décroît rapidement après l'établissement du courant. En effet, l'électrolyse de l'eau accompagne le fonctionnement de l'élément; de l'hydrogène se dépose sur la cathode de cuivre, *ce qui diminue la force électromotrice.*

Ajoutons que le zinc se transforme en sulfate de zinc qui remplace l'acide sulfurique et augmente la résistance de l'élément.

Dépolarisation de la plaque positive. — Pour débarrasser le cuivre de l'hydrogène qui s'y dépose, on peut opérer *mécaniquement* en agitant le liquide ou en brossant la lame.

Les *nettoyages chimiques* sont préférables; ils brûlent l'hydrogène par des corps dépolarisants riches en oxygène : acide chromique, acide nitrique, sulfate de cuivre, etc.

723. Piles à un liquide à dépolarisants chimiques. — Leur constance est suffisante pour beaucoup d'applications.

Élément au bichromate de potassium (fig. 843). — Dissolution *de bichromate de potassium* additionnée d'acide sulfurique. Au pôle négatif une lame Z de zinc amalgamé. Deux lames C de charbon de cornue, conducteur de l'électricité, au pôle positif. Le bichromate de potassium est réduit par l'hydrogène dégagé. *Force électromotrice*: environ 2v; *résistance* : environ 0ω,01, elle est d'autant plus faible que le liquide contient plus d'acide (1).

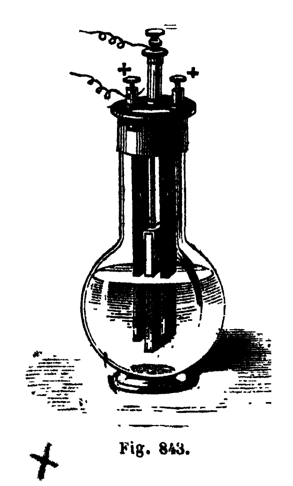


Fig. 843.

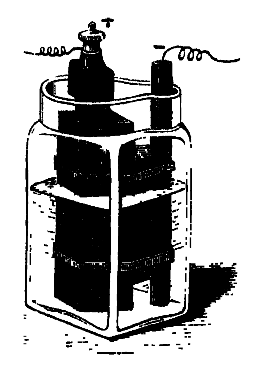


Fig. 844.

Élément Leclanché (fig. 844). — Solution saturée de chlorure d'ammonium. Une baguette de zinc forme le pôle négatif. Le pôle positif, au centre du vase, est une lame de charbon à laquelle est accolé, comme dépolarisant, un mélange solide de peroxyde de manganèse et de charbon agglomérés.

En circuit fermé, AzH^4Cl se décompose en Cl à l'anode, AzH^3 et H à la cathode. Il y a formation de chlorure de zinc à l'anode; l'hydro-

(1) Quand on n'emploie pas la pile, on relève la plaque de zinc pour qu'elle ne plonge pas dans le liquide.

gène réduit, à la cathode, le peroxyde de manganèse à l'état de sesquioxyde; AzH^3 se dégage. Le peroxyde de manganèse solide ne cédant que lentement son oxygène, cette pile ne convient pas pour des courants continus intenses; elle est très employée pour le fonctionnement intermittent des sonneries (1).

Force électromotrice : 1v,46. *Résistance :* une fraction d'ohm.

724. Piles constantes à deux liquides séparés. — La lame positive occupe un vase poreux qui contient un liquide dépolarisant.

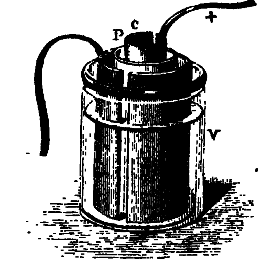


Fig. 845.

Élément Daniell (fig. 845). — Le pôle négatif est un cylindre creux de zinc, Z, placé dans une dissolution de sulfate de zinc. Le pôle positif est une lame de cuivre C qui plonge dans une solution *saturée* de sulfate de cuivre, contenue dans un cylindre de porcelaine poreuse. Le vase poreux se laisse peu pénétrer par les liquides tout en s'opposant à leur mélange; il est traversé facilement par le courant.

Fonctionnement. — A circuit fermé, les liquides sont électrolysés. Le sulfate de zinc est décomposé en SO^4 qui se porte sur l'anode zinc, et en zinc libre qui se porte vers la cathode cuivre. Le sulfate de cuivre est décomposé en cuivre qui se dépose sur la cathode cuivre et en SO^4 qui va à l'anode zinc et forme du sulfate de zinc avec le zinc libre.

Il disparaît une molécule de sulfate de zinc et une molécule de sulfate de cuivre; il se forme deux molécules de sulfate de zinc. En définitive, du sulfate de zinc *se substitue* à un poids équivalent de sulfate de cuivre. Le zinc s'use et le cuivre s'épaissit. La solution de sulfate de cuivre tend à s'épuiser; on la maintient saturée avec des cristaux de sulfate.

Force électromotrice 1v,1. Grande *résistance;* pile très constante, employée surtout en télégraphie.

Élément Bunsen. — Au pôle négatif *n*, un cylindre Z de zinc amalgamé est placé dans un bocal en grès qui contient de l'eau acidulée sulfurique. Au centre du bocal, un vase cylindrique V en porcelaine poreuse renferme un prisme de charbon de cornue C qui plonge dans l'acide nitrique (fig. 846). Une borne *m* fixée au charbon est le pôle positif.

(1) Dans les *éléments secs*, pour faciliter le transport, le liquide est immobilisé par des substances gélatineuses.

Fonctionnement. — A circuit fermé, l'eau acidulée est décomposée

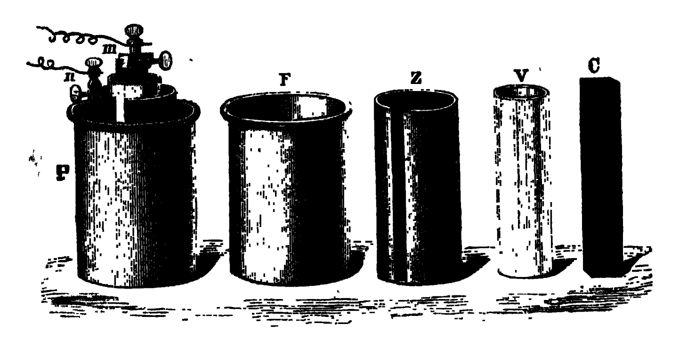


Fig. 846.

en SO^4 et H^2, l'acide azotique en O et AzO^2; SO^4 se combine au zinc sur lequel il se porte, H^2 s'unit à l'oxygène, AzO^2 se dégage. On supprime les dégagements nitreux en remplaçant l'acide azotique par une dissolution d'acide chromique.

Force électromotrice $1^v,9$. *Résistance* faible. Cette pile convient pour de forts courants.

725. Étalon de force électromotrice. — C'est un élément construit suivant des règles précises et ayant une force électromotrice très exactement connue.

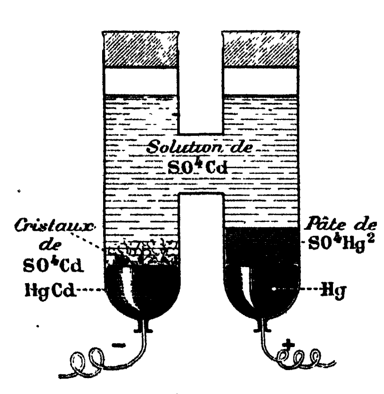


Fig. 847.

L'élément de Weston (fig. 847) dont la force électromotrice est 1^v0186 à 20° est construit de la façon suivante : Le *pôle positif* est un fil de platine plongé dans du mercure pur. Le mercure est surmonté d'une pâte de sulfate mercureux mélangé à une solution saturée de sulfate de cadmium. Le *pôle négatif* est un fil de platine qui plonge dans un amalgame de cadmium recouvert d'une solution saturée de sulfate de cadmium.

ORIGINE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE D'UNE PILE

726. Phénomènes thermiques dans un circuit de pile fermé. — Les réactions chimiques d'un élément de pile sont **exothermiques**, c'est-à-dire dégagent de la chaleur. Dans un appareil à électrolyse, les réactions sont **endothermiques**, c'est-à-dire absorbent de la chaleur.

La chaleur Q, que les réactions chimiques d'une pile laissent dispo-

nible, ou l'énergie chimique JQ, *entretient, au moins, dans certains cas, toute l'énergie distribuée dans le circuit d'un courant.*

La démonstration a été faite par *Favre*, en enfermant un élément de Volta dans un calorimètre et en mesurant, dans *quatre* conditions différentes, la chaleur dégagée *pendant la dissolution de 33 gr. de zinc.*

Première expérience. — On mesure dans le calorimètre le nombre de calories Q que dégage la dissolution du zinc par l'eau acidulée sulfurique dans l'élément, *à circuit ouvert.*

Deuxième expérience. — Après avoir réuni les deux pôles par un fil fin de platine, on mesure le nombre de calories dégagées *à circuit fermé*, l'élément et le fil de platine étant contenus *à la fois* dans le calorimètre. On trouve le même nombre Q que dans la première expérience.

Troisième expérience. — On mesure *à circuit fermé*, *séparément*, la chaleur q dégagée *dans l'élément* placé seul dans le calorimètre (pour 33 gr. de zinc dissous), puis la chaleur q' dégagée *dans le fil* placé, à son tour, seul dans le calorimètre (pour une nouvelle dissolution de 33 gr. de zinc); on trouve $q + q' = Q$.

Quatrième expérience. — Le courant actionne, en le traversant, un moteur qui soulève un poids. La chaleur q_1 dégagée actuellement *dans le circuit* est moindre que s'il ne se produisait pas de travail mécanique; mais la chaleur q_1, ajoutée à la chaleur q'_1, *équivalente au travail accompli*, donne la même somme Q.

En résumé, la quantité de la chaleur dégagée dans le circuit et accusée au calorimètre pendant la dissolution de 33 grammes de zinc, est égale à la chaleur qui correspond aux réactions chimiques produites dans l'élément. Le dégagement de chaleur dans les conducteurs est complémentaire de la chaleur retenue dans la pile. Une partie de l'énergie due aux réactions chimiques est donc transportée par le courant dans le circuit extérieur. Un travail réalisé dans le circuit par le courant emprunte à la chaleur chimique totale une partie équivalente à ce travail.

727. Rôle d'une pile. — La pile transforme de l'énergie chimique en *énergie électrique* qui est répartie sous différentes formes dans le circuit : *thermique* dans l'échauffement de conducteurs, *chimique* dans l'électrolyse, *mécanique* dans les moteurs, etc.

Comparaison d'une pile et d'une machine à vapeur. — Une machine à vapeur convertit en énergie mécanique l'énergie chimique de la combustion du charbon. Une pile convertit l'énergie chimique de la combustion du zinc en diverses énergies, en passant par l'énergie électrique.

Une machine à vapeur n'a qu'un rendement très faible (**379**); le rendement d'une pile peut devenir très voisin de l'unité par le ralentissement du courant (**706**). Toutefois, le *prix élevé* des produits consommés par une pile et en particulier du zinc a empêché les piles d'être aussi économiques que les machines à vapeur.

728. Calcul de la force électromotrice d'un élément de pile. — Ce calcul se rapporte au cas où l'énergie *chimique disponible* est convertie, *seule et en totalité*, en énergie électrique dans le circuit.

Calcul pour l'élément Daniell. — Dans l'élément Daniell (**724**), il y a substitution de 33 grammes de zinc à 31 grammes de cuivre; la *différence*, 25 300 calories, entre les chaleurs de dissolution du zinc et du cuivre dans l'acide sulfurique (53 500 — 28 200), est rendue *disponible* par cette substitution; le travail correspondant est : 4,18.25300 joules.

D'autre part, l'énergie électrique qui accompagne ces réactions et qui est fournie par une pile de force électromotrice de E volts, débitant I*t* ampères en *t* secondes est EI*t* en joules; ici I*t* = 96600, puisqu'il passe 96600 coulombs par 33 grammes de zinc dissous.

On a donc 4,18.25300 = E. 96600, d'où E = 1v09 (1).

PILES SECONDAIRES

Piles à gaz (2). — Dans l'expérience qui démontre la polarisation (**714**), le courant secondaire du voltamètre dure peu. En maintenant les électrodes en contact avec les éléments séparés de l'eau, on obtient un courant qui persiste plus longtemps.

On construit un voltamètre dont les électrodes en platine sont fixées au sommet des éprouvettes E et E′ et pendent dans le liquide. Elles reçoivent le courant primaire par de petits godets à mercure *g*. Les éprouvettes sont remplies d'eau acidulée (fig. 848). Après un dégagement suffisant de gaz, *on supprime le courant primaire* et on relie les deux godets *g* par un conducteur. Il se produit un courant *secondaire*, contraire au courant *primaire*, qui a produit l'électrolyse; *les gaz dégagés* reforment de l'eau et le courant cesse quand ils ont disparu.

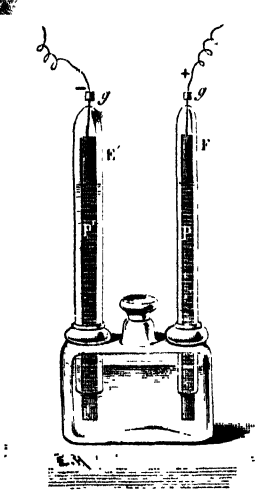


Fig. 848.

En associant en série plusieurs voltamètres semblables, on forme une *pile à gaz*. L'électrode hydrogène de l'un est reliée à l'électrode oxygène du suivant. Si l'on employait le courant secondaire d'une pile à gaz à décomposer l'eau, pour 1 gr. d'hydrogène dégagé dans un voltamètre extérieur, il disparaîtrait 1 gr. d'hydrogène dans chacun des éléments de la pile à gaz (**712**).

729. Accumulateurs. — Les accumulateurs sont des volta-

(1) Le calcul, ainsi fait, n'est exact que si la force électromotrice est indépendante de la température.

(2) La pile à gaz n'a qu'un intérêt historique, elle est sans application pratique.

mètres à *électrodes de plomb* qui peuvent fournir un courant secondaire de longue durée. Ils *jouent pratiquement le rôle de condensateurs de très grande capacité.*

Formation. — Par un courant primaire *de charge*, l'eau acidulée est décomposée, l'oxygène forme sur l'anode du peroxyde de plomb brun, adhérent, insoluble dans l'acide sulfurique étendu. Après quelque temps, l'anode est protégée par le peroxyde et l'oxygène se dégage. La cathode, de son côté, condense d'abord de l'hydrogène, puis ce gaz se dégage.

La plaque peroxydée est positive par rapport à la plaque hydrogénée ; si l'on réunit extérieurement les deux plaques par un fil après avoir supprimé le courant primaire, il se produit un courant secondaire *de décharge;* par ce courant, l'oxygène va oxyder l'anode, l'hydrogène va sur la cathode où il ramène le peroxyde à l'état de plomb. Le courant cesse lorsque les deux électrodes sont redevenues semblables.

Les accumulateurs s'améliorent par l'usage. Par des charges et des décharges successives, les surfaces des électrodes se recouvrent de plomb pulvérulent et permettent aux actions chimiques d'avoir lieu profondément. Les substances actives sont le peroxyde de plomb et le plomb spongieux. La durée des charges et des décharges croît graduellement, et le débit augmente.

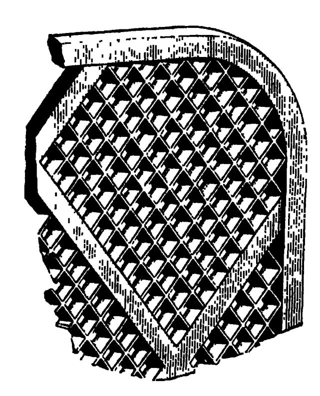


Fig. 849.

On *réduit le temps de formation* en emprisonnant des oxydes de plomb dans des alvéoles pratiquées dans les électrodes (1) (électrodes à grilles) (fig. 849). Une plaque est ainsi formée d'une partie active soutenue par une carcasse de plomb inactive.

Constantes d'un accumulateur. — La force électromotrice d'un accumulateur à lames de plomb, est un peu supérieure à deux volts; par le rappro-

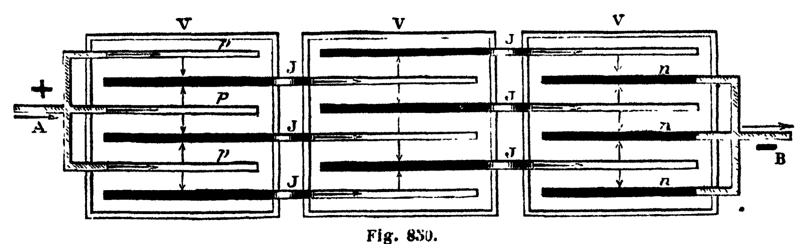


Fig. 850.

(1) Dans les alvéoles de la lame positive on a déposé une pâte de minium et dans les alvéoles de la lame négative une pâte de litharge ; dans la charge, l'oxygène dégagé à l'anode transforme le minium en peroxyde de plomb. L'hydrogène dégagé à la cathode réduit la litharge et la transforme en plomb poreux.

chement des lames et leur grande surface, on rend la *résistance intérieure très faible* (1). Les accumulateurs conservent longtemps leur charge sans grande perte, à circuit ouvert; un accumulateur débite, pendant la décharge, un nombre de coulombs peu différent de celui qu'il a reçu pendant la charge.

Charge et décharge. — La charge se fait avec une source qui présente à ses pôles une différence de potentiel ayant au moins autant de fois $2^v,5$ qu'il y a d'accumulateurs groupés en série. L'énergie utilisable dans la décharge est E'I par seconde, E' est la différence de potentiel aux bornes extrêmes *à circuit fermé* et I l'intensité du courant de décharge. Dès le début de la décharge, le voltage d'un accumulateur tombe rapidement à 2 volts (2).

Capacité. — Si la décharge est effectuée à intensité constante, le produit de l'intensité en ampères par la durée de la décharge en secondes est égal au nombre de coulombs emmagasinés.

La capacité d'un accumulateur s'exprime en *ampères heure,* nombre d'ampères que le courant de l'accumulateur donnerait si sa décharge, poussée à sa limite pratique, s'effectuait en une heure. L'ampère heure vaut 3600 coulombs.

Si, dans un accumulateur, la différence moyenne de potentiel pendant la décharge est 2 volts et si le nombre d'ampères heure est n, l'énergie potentielle de l'accumulateur en joules est $2n3600$.

Puissance. — La force électromotrice d'un accumulateur étant 2 volts pendant la décharge, la puissance est de 10 watts si le débit est de 5 ampères. Comme on ne doit pas dépasser sans dommage 3 ampères par kg. de plaques (ce qui correspond à 6 watts), la *puissance pratique est proportionnelle au poids.*

Mode de fonctionnement d'un accumulateur. — Un accumulateur est assimilable à un condensateur; toutefois, ses électrodes *n'emmagasinent pas directement l'électricité.*

Pendant la charge, l'accumulateur est un *voltamètre;* des réactions qui absorbent de la chaleur sont effectuées par le courant, et des produits chimiques se déposent sur les électrodes. L'énergie électrique du courant de charge s'emmagasine sous la forme potentielle d'énergie chimique.

Dans la décharge, des réactions chimiques inverses des premières

---

(1) ***Mesure de la résistance intérieure.*** — Appelons E la différence de potentiel à circuit ouvert aux bornes de la batterie d'accumulateurs, E' cette différence aux bornes pendant la charge, $E' = E - I\lambda$. On mesure E' et E avec un voltmètre, I avec un ampèremètre et on calcule λ.

(2) Après avoir chargé *séparément* et *successivement* des accumulateurs avec deux éléments Bunsen, on peut, en les groupant *en série,* avoir une force électromotrice importante. Ainsi, avec 30 accumulateurs, chargés *séparément* avec moins de 4 volts (2 éléments Bunsen), on peut former une pile dont la force électromotrice dépasse 60 volts.

dégagent de la chaleur qui est distribuée dans le nouveau circuit. L'accumulateur fonctionne alors *comme élément de pile*, et les produits déposés, pendant la charge, sur ses plaques, disparaissent graduellement. L'énergie chimique régénère l'énergie électrique.

Dans une pile ordinaire, les produits des réactions sont perdus après épuisement de la pile; dans un accumulateur, les produits de décomposition sont régénérés par un courant de charge.

Certaines piles sont toutefois *réversibles* comme des accumulateurs. Dans un élément Daniell à sulfates qui a servi et dont le zinc a diminué, tandis que le cuivre s'est épaissi, faisons passer un courant *opposé au sien*, de force électromotrice plus grande, le sulfate de zinc formé est réduit : du zinc se dépose sur le zinc, le cuivre est dissous. Supprimant le courant de charge, si l'on réunit les pôles, l'élément fonctionne de nouveau dans le *sens direct* : le zinc déposé par électrolyse se dissout et le cuivre dissous se dépose.

Les accumulateurs sont très employés dans l'industrie, pour l'éclairage et pour la traction (1). Ils ont de grandes dimensions si on veut un débit considérable.

PILES THERMO-ÉLECTRIQUES

730. Si la chaleur dégagée par les actions chimiques entretient le courant des piles, l'action directe de la chaleur donne également naissance à des courants thermo-électriques.

Dans un *circuit de différents métaux à la même température*, il ne se produit aucun courant (**677**), mais un courant s'établit dès qu'on chauffe un des points de contact.

Expérience de Seebeck. — Un circuit est composé d'un barreau de bismuth BB′ soudé à une lame d'antimoine AA′ qui forme avec lui un rectangle. On oriente le rectangle dans le plan du méridien magnétique, après avoir placé à l'intérieur une aiguille aimantée mobile sur un pivot (fig. 851).

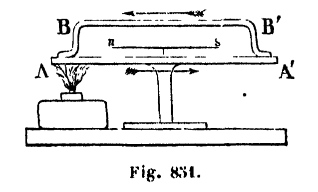


Fig. 851.

(1) Une batterie d'accumulateurs peut assurer un service *direct*, en fournissant un courant comme une pile. Elle peut actionner un moteur à courant continu dans le cas de traction sur route ou par bateaux. Les voitures portent les accumulateurs qui sont rechargés à la station d'arrivée.

En dehors des heures d'utilisation d'une source d'énergie, telle qu'une chute d'eau, une batterie d'accumulateurs se charge par l'intermédiaire d'une machine de Gramme; elle ajoute ensuite son travail à celui de la chute aux heures d'utilisation.

Si l'on chauffe l'un des contacts A, une déviation de l'aiguille indique l'existence d'un courant qui va du *bismuth à l'antimoine à travers le contact chaud.* En refroidissant le même contact avec de la glace, il se produit un courant de sens inverse.

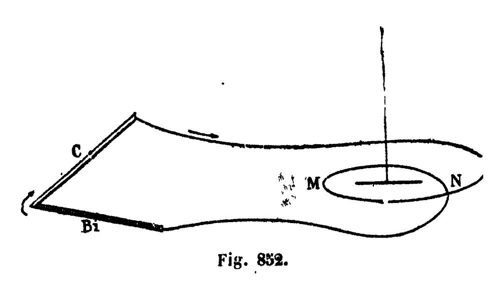


Fig. 852.

On peut encore faire l'expérience en soudant à un barreau Bi de bismuth un fil de cuivre C qui vient s'enrouler sur le cadre d'un galvanomètre (fig. 852). Un courant va du bismuth au cuivre à travers la soudure chaude et parcourt le circuit extérieur dans le sens CNM.

Le bismuth est dit *positif* par rapport au cuivre et à l'antimoine. Le sens du courant dépend de la nature des deux métaux. Le courant est *constant* si les températures des deux soudures restent fixes.

731. Pile thermo-électrique. — On forme une pile en reliant le pôle positif d'un premier couple au pôle négatif d'un second, le pôle positif du second au pôle négatif d'un troisième, etc... On réunit le pôle positif du dernier au pôle négatif du premier.

Si l'on chauffe à T^0 les contacts de rang pair, en maintenant froids les contacts de rang impair, les courants partiels sont tous de même sens et le courant total est leur somme.

Dans cette association *en série,* l'intensité est : $I = \frac{nE}{n\lambda + r}$;
E force électromotrice d'un couple, n nombre de couples; λ résistance intérieure d'un couple, r résistance extérieure, $n\lambda + r$ résistance totale du circuit (**697**).

Avec des couples formés de barreaux métalliques gros et courts, $n\lambda$ est négligeable, $I = \frac{nE}{r}$; l'intensité varie alors en raison inverse de la résistance extérieure. Si la résistance extérieure est très réduite, l'intensité augmente notablement.

Les *forces électromotrices thermo-électriques sont très faibles.* La force électromotrice d'un élément Daniell vaut 180 fois celle d'un élément bismuth-cuivre dont les contacts sont à 100^0 et 0^0. Avec une aussi faible force électromotrice, un courant thermo-électrique ne surmonte que de petites résistances; l'interposition d'une mince couche liquide l'annule presque, et il faudrait pour l'électrolyse un très grand nombre d'éléments.

Le cadre des galvanomètres employés avec les courants thermo-électriques n'est recouvert que de quelques tours de gros fil (**748**).

732. Lois des forces électromotrices. — 1° *Loi des températures successives.* — Pour un couple, la force électromotrice obtenue avec un contact à T° et l'autre à T'° est la somme des forces électromotrices obtenues en portant d'abord les contacts à T et à θ (le premier à T et le second à θ), puis à θ et T' (le premier à θ et le second à T'); θ étant une température comprise entre T et T'.

2° *Loi des métaux intermédiaires.* — Deux métaux M et M_1 sont en contact en C et le contact C est maintenu à t^0. Si les extrémités A et B sont séparées par plusieurs métaux m_1 et m_2 avec des contacts A, D, B à T°, la force électromotrice totale est la même que si A et B étaient en contact direct à T° (fig. 853).

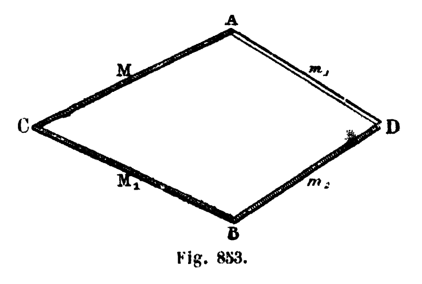


Fig. 853.

Par suite, une soudure interposée entre deux métaux n'influe pas sur la force électromotrice du couple.

3° *Loi analogue à la loi de Volta.* — Désignons par $E_{A|B}$ la force électromotrice thermo-électrique d'un couple A et B, où A est positif par rapport à B; si l'on mesure les forces électromotrices pour trois couples A et B, A et C, C et B, on obtient : $E_{A|B} = E_{A|C} + E_{C|B}$. Comme la force électromotrice $E_{C|B}$ peut ainsi se calculer avec $E_{A|B}$ et $E_{A|C}$, on obtient toutes les forces électromotrices, en les mesurant par rapport à un même métal A.

4° *Variation avec la différence des températures.* — La force électromotrice pour un couple déterminé dépend de la différence des températures des deux soudures et de leur valeur absolue. Pour des températures *peu* écartées, elle est sensiblement proportionnelle à leur différence.

Phénomène de l'inversion. — Le courant n'augmente pas, dans tous les cas, d'une façon continue quand on élève la température de la soudure chaude. Ainsi, avec un couple fer-cuivre, le courant est maximum quand la soudure chaude atteint 274°. Au delà, pour une température croissante, le courant décroît, devient nul et enfin change de sens.

L'inversion se présente pour chaque couple thermo-électrique, sa température varie avec la nature des métaux du couple.

MESURE DES TEMPÉRATURES

733. Les piles thermo-électriques sont utilisées pour la mesure des températures.

Thermomultiplicateur. — La pile de Melloni, employée en chaleur rayonnante (**324**), pour la mesure de faibles différences de température, est formée de barreaux de bismuth alternant avec

des barreaux d'antimoine ; son circuit comprend un galvanomètre. Quand un faisceau calorifique tombe sur l'une des faces de la pile, l'autre face restant à une température constante (fig. 854), il se produit un courant dont la force électromotrice est proportionnelle à la différence de température des deux faces et à la déviation du galvanomètre lorsque celle-ci reste suffisamment petite.

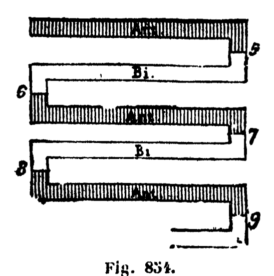


Fig. 854.

Pince thermo-électrique. — Une pince thermo-électrique consiste en deux couples thermo-électriques, disposés *en série*. Le point dont on veut mesurer la température θ est interposé entre deux soudures de même parité (fig. 855). La déviation du galvanomètre placé dans le circuit mesure θ — *t*, *t* est la température à laquelle restent les soudures qui ne comprennent pas le corps chaud MN.

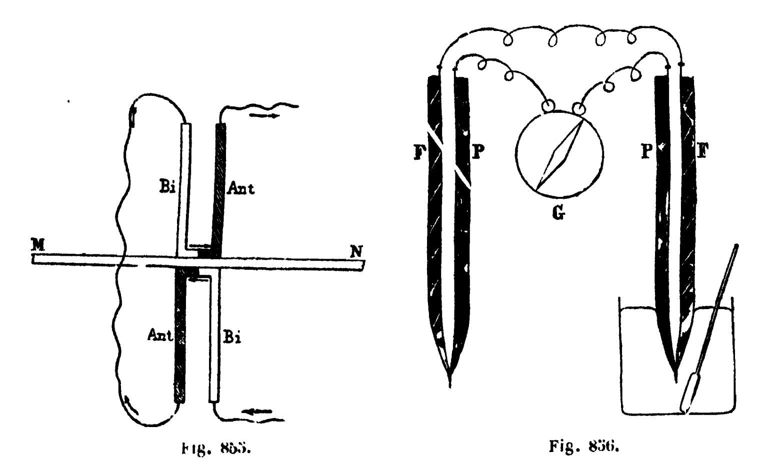


Fig. 855. Fig. 856.

Aiguilles thermo-électriques. — Ces aiguilles sont formées de deux soudures *fer-maillechort*, dont les courants doivent *s'opposer* (fig. 856). L'une est placée dans le milieu dont on cherche la température, l'autre est plongée dans un bain qu'on échauffe ou qu'on refroidit de telle façon qu'un galvanomètre G placé dans le circuit reste au zéro. La température cherchée est la température du bain.

Pyromètre électrique. — Cet appareil, spécial aux températures élevées, consiste en un circuit comprenant un galvanomètre et un couple *platine-platine rhodié* $\left(\frac{1}{10}\text{ de rhodium}\right)$, dont l'une des soudures est portée dans le foyer, tandis que l'autre reste à la température ambiante. Une graduation a été établie, par les déviations d'un galvanomètre, quand la soudure chauffée a été plongée successivement dans des bains de tem-

pératures connues : plomb fondu (325°), soufre en ébullition (448°), argent fondu (945°), or fondu (1050°), palladium fondu (1500°).

734. Piles thermo-électriques industrielles. — Certaines associations de métaux et d'alliages donnent des forces électromo-

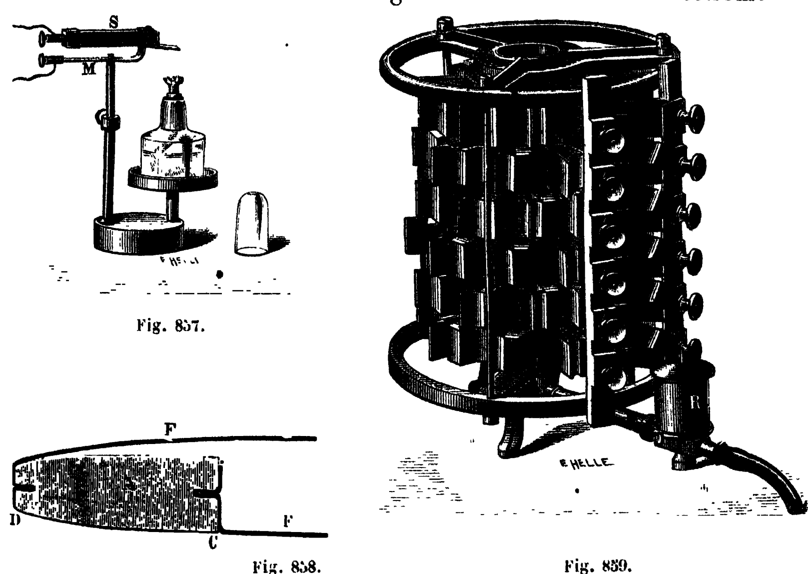


Fig. 857.

Fig. 858.

Fig. 859.

trices notablement supérieures à celles des métaux simples. Avec l'élément *maillechort-sulfure de cuivre* (fig. 857), 40 couples chauffés au gaz et groupés en série décomposent l'eau.

On forme une couronne de dix couples en série d'un *alliage de zinc et d'antimoine soudé à une lame de fer* F (fig. 858). On superpose des couronnes isolées les unes des autres par des rondelles d'amiante. Le pôle positif d'une couronne est relié au pôle négatif de la couronne suivante. Le tout forme un cylindre creux chauffé intérieure-

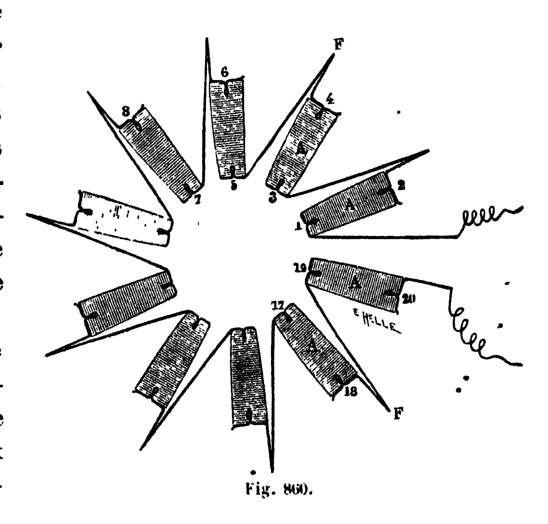


Fig. 860.

ment par une flamme (fig. 859). Les soudures paires sont disposées sur la surface extérieure du cylindre, les soudures impaires sur la surface intérieure (fig. 860).

Soixante de ces éléments forment une pile dont la force électromotrice atteint 2ᵛ,5, avec une résistance intérieure d'un demi-ohm.

735. Source de l'énergie électrique d'une pile thermo-électrique. — La production d'un courant thermo-électrique exige une dépense de chaleur à la source chaude. Une portion de la chaleur dépensée est convertie en énergie électrique, et celle-ci se transforme à son tour en chaleur dégagée dans le circuit que parcourt le courant. *La chaleur dégagée dans le circuit se divise en deux parts :* une partie est distribuée conformément à la loi de Joule et utilisable (du moins la fraction qui appartient au circuit extérieur), une autre partie réchauffe la soudure froide; aussi, pour maintenir le courant, il faut refroidir cette soudure afin d'éviter l'égalisation de température qui tend à se produire.

De même, dans une machine à vapeur, une partie de la chaleur fournie à la vapeur est utilisable, tandis qu'une autre partie passe dans un condenseur dont la température est maintenue basse par un apport d'eau froide.

Le ***rendement*** est le rapport de la chaleur utilisable dans le circuit à la chaleur dépensée dans le même temps, en une heure, par exemple.

La chaleur *maximum utilisable* est la chaleur dégagée en une heure, par le courant thermo-électrique dans un circuit extérieur de résistance égale à la résistance de la pile (**706**).

D'autre part, si l'on évalue le débit du gaz à l'heure et le nombre de calories que ce gaz fournit en brûlant, on a la chaleur dépensée.

L'absorption de chaleur par la soudure froide n'agit pas seule pour diminuer le rendement, une grande partie de la chaleur du foyer passe, en outre, par *conductibilité* calorifique des soudures chaudes aux soudures froides. En définitive, le rendement est très faible.

ÉLECTROMAGNÉTISME

Les actions magnétiques d'un courant forment l'objet de l'électromagnétisme. L'étude de ces actions a eu pour point de départ l'expérience d'Œrsted.

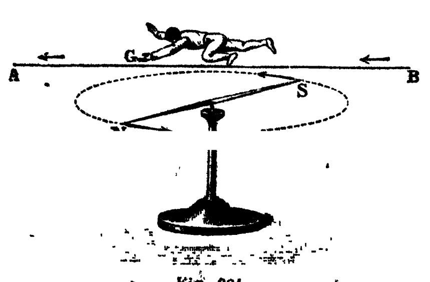


Fig. 861.

736. Expérience d'Œrsted. — Œrsted découvrit en 1819 l'action d'un courant sur un aimant. En disposant, dans le plan du méridien magnétique, un fil de cuivre rectiligne

et horizontal AB (fig. 861), au-dessus d'une aiguille aimantée, mobile sur un pivot et en équilibre, l'aiguille *est déviée* dès qu'on fait passer un courant dans le fil. L'aiguille reprend sa position d'équilibre si on ouvre le circuit. Le sens de la déviation change si l'on renverse le courant.

Règle d'Ampère. — L'orientation des pôles dépend de la position du conducteur et du sens du courant. D'après une règle due à Ampère, *le pôle* **nord** *de l'aimant se porte à la* **gauche** *du courant.* La *droite* et la *gauche du courant* sont la droite et la gauche d'un nageur qui *suit le courant,* la face tournée vers l'aimant (fig. 861).

La déviation de l'aimant est d'autant plus grande que le courant est plus fort et plus voisin de l'aimant. Avec un fort courant, l'aiguille *tend à se mettre en croix* avec le courant.

Action de la Terre. — L'aimant s'écarte du méridien magnétique jusqu'à ce que l'effet du courant soit équilibré par l'action du couple terrestre qui augmente avec la déviation et qui ramène l'aiguille.

Une aiguille aimantée se met *toujours* en croix avec le courant, si elle est mobile autour d'un axe passant par son centre de gravité et parallèle à la force magnétique terrestre; elle est alors soustraite à la fois à l'action de la pesanteur et au magnétisme terrestre.

Champ magnétique d'un courant. — D'après l'expérience d'Œrsted, un courant crée autour de lui un champ magnétique, qui disparaît avec le courant. Comme pour les aimants, ce champ magnétique est révélé par des spectres magnétiques.

Spectre magnétique d'un courant rectiligne. — On saupoudre de limaille de fer une feuille de carton horizontale traversée par un conducteur vertical xy, que parcourt un fort courant. Sous l'influence du courant, les particules de limaille deviennent de petits aimants; en facilitant leur groupement par de petites secousses, elles se disposent *en circonférences qui ont pour centre la trace du fil* (fig. 862) et figurent les lignes de force du champ magnétique. Ce spectre magnétique reste le même quand on fait glisser le carton,

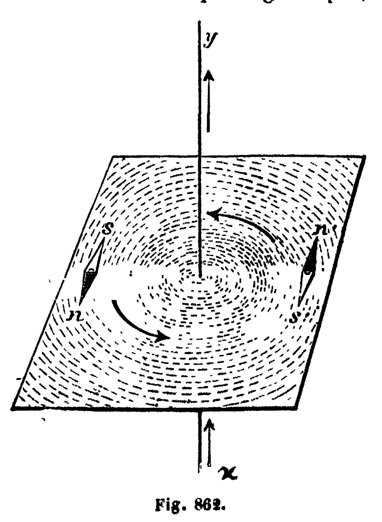


Fig. 862.

parallèlement à lui-même le long du fil. Les lignes de force suivent l'axe des particules de limaille.

Dans l'expérience d'Œrsted, la ligne des pôles est tangente à la ligne de force au point où est l'aimant.

737. Action magnétique d'un circuit. — Un circuit plan, vertical, dont le plan se confond avec le plan du méridien magnétique et qui entoure une aiguille aimantée, exerce sur elle, par tous ses éléments, une action de même sens. En effet, si l'on fait suivre successivement au nageur d'Ampère toutes les parties du circuit, en lui faisant regarder constamment l'aimant, sa gauche se maintient du même côté du cadre et toutes les parties *s'accordent* à pousser le pôle nord de ce côté (fig. 863).

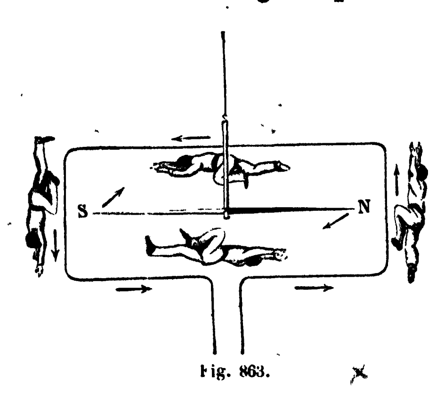


Fig. 863.

Spectre magnétique d'un circuit plan. — On obtient la direction des lignes de force d'un circuit ou d'un cadre en plaçant son plan verticalement et en jetant de la limaille sur un carton horizontal traversé par le cadre (fig. 864). Aux points où le cadre perce le carton, les courbes sont circulaires ; dans la partie centrale, elles sont à peu près rectilignes et parallèles. Le spectre est celui que produirait un mince aimant plat, ou **feuillet magnétique**, *limité par le contour du circuit, aimanté transversalement, c'est-à-dire normalement au plan du circuit, positivement sur l'une de ses faces, négativement sur l'autre, et ayant sa face nord ou positive à la gauche du courant.*

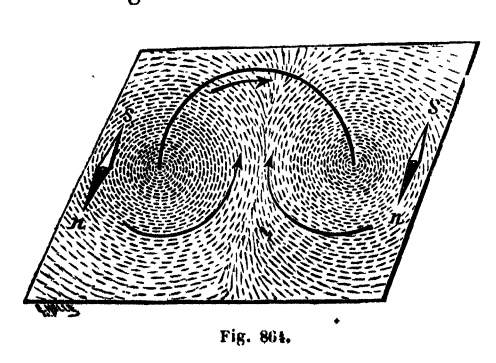


Fig. 864.

L'assimilation d'un courant et d'un feuillet magnétique est, d'ailleurs, une conséquence d'un théorème établi par Ampère.

Théorème d'Ampère. — *Un petit courant plan, fermé, exerce la même*

action magnétique qu'un aimant dont l'axe serait normal au plan du courant et dont le moment μl serait égal à $\frac{sI}{10}$, *s* étant la surface enveloppée par le courant et I l'intensité du courant en ampères. Le pôle ***nord*** du petit aimant équivalent (fig. 865) est situé à la gauche du courant. Ce théorème *s'étend à un circuit fermé* quelconque.

Fig. 865.

En effet, par le contour du circuit BCDE, faisons passer une surface, et découpons la par deux systèmes de courbes *ab* et *af* très voisines; nous la décomposons ainsi en circuits très petits tels que *abef*. Supposons les contours de ces petits circuits parcourus par des courants *de même sens* et de même intensité que le courant du grand contour (fig. 866). Chaque ligne de séparation sur un circuit intérieur serait parcourue par deux courants égaux et contraires dont les *actions extérieures s'annulent*. Les éléments situés sur le contour extérieur agissent alors seuls. Il revient donc au même de considérer l'action du courant extérieur ou de lui substituer tous les petits circuits plans qui proviennent de la subdivision. Puisque chacun des petits circuits peut être remplacé, *au point de vue de son action magnétique*, par un petit aimant qui lui est normal, l'ensemble agit comme un **feuillet magnétique**, ayant le contour du circuit, et sa face nord à la gauche du courant.

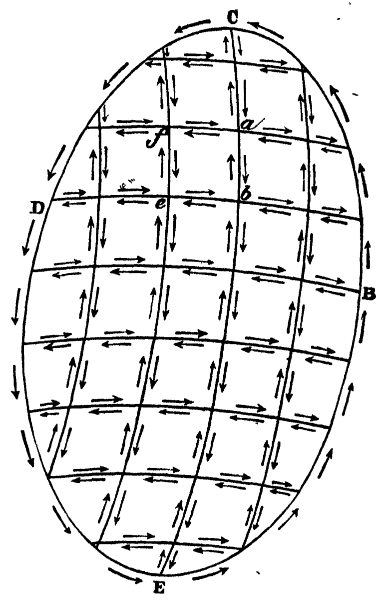


Fig. 866.

Les masses magnétiques μ du feuillet équivalent sont données par $\mu l = \frac{sI}{10}$, où μ et l sont arbitraires, pourvu que μl reste égal à sI; elles peuvent être choisies de façon à se trouver partout distantes de l'épaisseur l du feuillet. D'après $\mu = \frac{sI}{10l}$, les masses sont alors proportionnelles aux surfaces s des éléments de la surface du feuillet et à l'intensité I du courant. En posant $\sigma s = \mu$, on a $\sigma l = \frac{I}{10}$ (σ densité magnétique).

Par l'assimilation (1) d'un courant et d'un feuillet magnétique, les actions électromagnétiques deviennent des actions magnétiques.

(1) Cette assimilation est limitée aux actions exercées à distance par un circuit fermé.

738. Supports des courants mobiles (fig. 867). — Sur un socle à vis calantes sont fixées deux bornes A et D. Entrant en A, le courant se dirige dans une tige centrale de laiton, surmontée d'une coupe en acier *a* qui renferme du mercure. De la coupe, le courant suit, par *n*OC, un conducteur mobile et revient par B*m* dans le mercure d'un godet annulaire en ébonite V. Le fond du godet com-

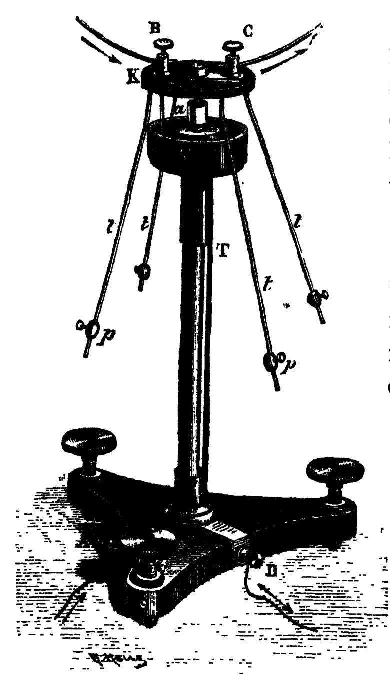


Fig. 867.

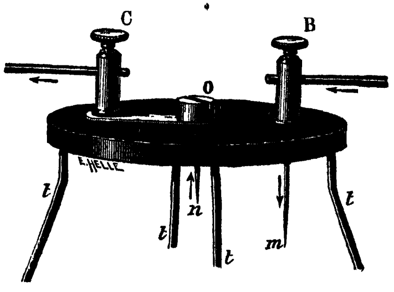


Fig. 868.

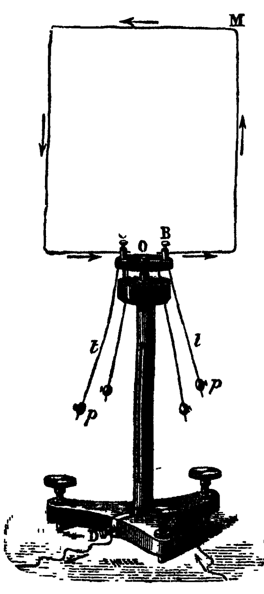


Fig. 869.

munique par des vis en fer avec un cylindre creux de laiton T qui entoure la tige centrale sans la toucher et est ensuite relié métalliquement à la borne de sortie D.

L'équipage mobile (fig. 868) est formé d'un disque en ébonite portant deux bornes B et C, auxquelles aboutit le conducteur en expérience. Une lame métallique relie la borne C au centre O, qui repose par une pointe *n* sur le fond de la coupe *a;* la borne B se continue par une autre pointe plus longue *m* qui plonge dans le mercure du godet V. Le courant suit ainsi la route *an*OC.. B*m*V. Le réglage de tiges *t*, munies de curseurs *p* et fixées au disque d'ébonite, rend le disque horizontal et fait descendre le centre de gravité de l'équipage au-dessous de la pointe qui sert de pivot.

739. Orientation d'un cadre traversé par un courant. — Soit un cadre mobile autour d'un axe vertical. Tant qu'il n'est pas traversé par un courant, il reste en équilibre dans toute position. Si l'on y fait passer un courant, il s'oriente (fig. 869) *perpendiculairement à la direction de l'aiguille de déclinaison* au lieu où l'on se trouve, comme un feuillet magnétique plan dont l'axe, perpendiculaire au cadre, se dirige suivant l'aiguille de déclinaison.

Le courant a donc une **face nord** et une **face sud**.

Appelons l la distance des deux faces du feuillet plan, S la surface du feuillet, σ la densité magnétique ; la masse magnétique du feuillet est $S\sigma$, le moment magnétique du feuillet est $S\sigma l = \frac{SI}{10}$, d'après $\sigma l = \frac{I}{10}$. En désignant par H la composante horizontale terrestre, au lieu de l'expérience, le moment du couple directeur qui agit sur le cadre est $\frac{HSI}{10}$.

Action d'un aimant sur un cadre. — Si l'on approche un aimant d'un courant mobile autour d'un axe vertical, il y a répulsion lorsque les faces en regard de l'aimant et du courant sont de même nom, attraction quand elles sont de noms contraires.

740. Systèmes astatiques. — Les équipages mobiles des

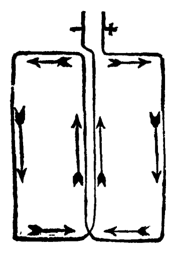


Fig. 870.

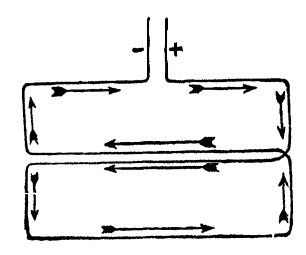


Fig. 870 *bis*.

fig. 870 et 870 *bis* ne sont pas susceptibles d'être dirigés. Ils comprennent, en effet, deux surfaces *égales* sur le contour desquelles le même courant circule *en sens contraires ;* ils sont équivalents à un système *astatique* de deux feuillets également aimantés. Ces deux surfaces sont symétriques par rapport à l'axe de rotation.

741. Solénoïdes. — Un solénoïde est un ensemble de courants circulaires égaux, de même intensité, de même sens, très voisins, parallèles et équidistants, ayant leurs centres sur une même droite et leurs plans perpendiculaires à cette droite. On réalise pratiquement un solénoïde en enroulant en hélice un fil conducteur (fig. 871).

Spectre d'un solénoïde. — Suivant l'axe d'un solénoïde horizontal,

plaçons un carton sur lequel nous jetons de la limaille : les lignes

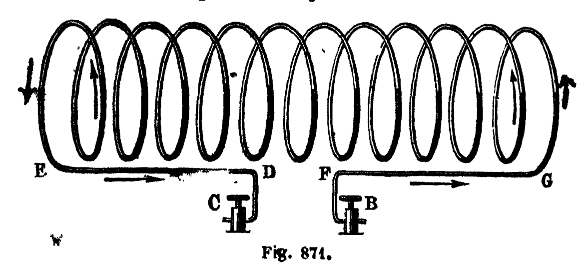


Fig. 871.

de force du champ magnétique intérieur (fig. 872) sont parallèles à l'axe, elles divergent à la sortie du solénoïde et s'épanouissent en *courbes fermées* qui sortent par une extrémité pour rentrer par l'autre. Un solénoïde, comme un aimant, s'oriente par l'action terrestre et il exerce des actions magnétiques.

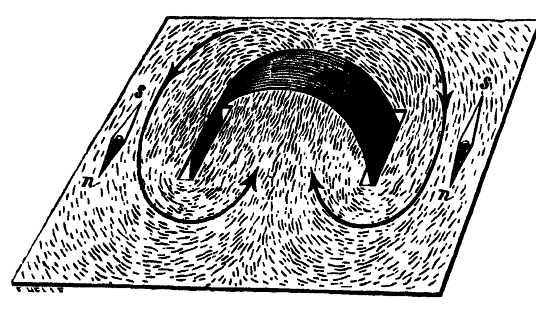


Fig. 872.

En un point du champ magnétique d'un solénoïde, la force magnétique qui agit sur l'unité de magnétisme est aussi le flux de force qui traverse en ce point une surface d'un cm² perpendiculaire à la direction de la force.

On démontre qu'à l'intérieur d'un solénoïde à axe rectiligne, la force magnétique, parallèle à l'axe, a pour valeur :

$$H = \frac{4\pi N}{L} \cdot \frac{I}{10}.$$

I intensité du courant en ampères, N nombre total de spires, L longueur du solénoïde.

Si la section du solénoïde est S, le flux qui la traverse est HS.

Orientation d'un solénoïde. — Suspendu horizontalement sur le support des courants mobiles, un solénoïde s'oriente comme chacun de ses courants circulaires; *l'axe du solénoïde prend la direction de l'aiguille de déclinaison.* Une extrémité se dirige vers le nord : on l'appelle *pôle nord.* Le *pôle sud* est l'extrémité qui regarde le sud (fig. 873). Le pôle nord est *à la gauche du courant;* un observateur qui ferait face au pôle *nord* N, y verrait le courant circuler en *sens inverse* des aiguilles d'une montre.

Le solénoïde tourne de 180° si l'on renverse le sens du courant. Il

perd ses propriétés magnétiques, si l'on interrompt le courant.

Un solénoïde, mobile autour d'un axe vertical, est soumis à l'action d'un couple terrestre dont le moment est $\mathcal{M}$H, H composante horizontale terrestre, $\mathcal{M}$ moment magnétique du solénoïde. Pour une spire, le moment $\mathcal{M}$ est $\frac{SI}{10}$; pour les N spires, c'est $\frac{NSI}{10}$. Le moment du couple directeur est $\frac{HNSI}{10}$.

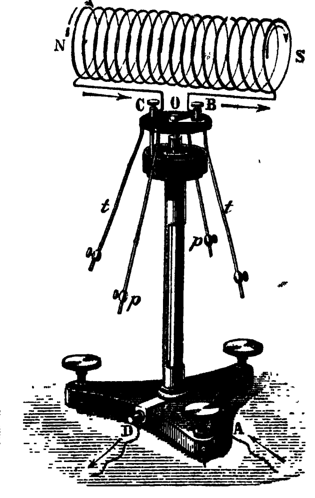


Fig. 873.

L'axe d'un solénoïde, qui est entièrement libre et qui est soutenu par son centre de gravité, prend la direction d'une *aiguille d'inclinaison*.

Action d'un aimant sur un solénoïde. — Le pôle nord d'un solénoïde mobile est repoussé par le pôle nord d'un aimant (fig. 874); il est attiré par le pôle sud de l'aimant.

Action d'un courant sur un solénoïde. — Sur un solénoïde mobile, orienté dans le méridien magnétique, on fait agir un courant rectiligne fixe *xy*, parallèle à l'axe du solénoïde : le pôle nord du solénoïde est dévié à la gauche du courant et tend à se mettre en croix avec lui (fig. 875). L'action directrice de la Terre limite la déviation, comme elle limite la déviation d'un aimant par un courant.

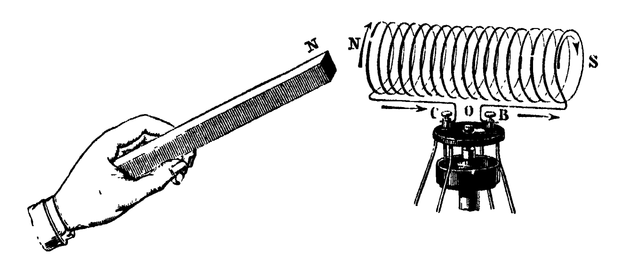


Fig. 874.

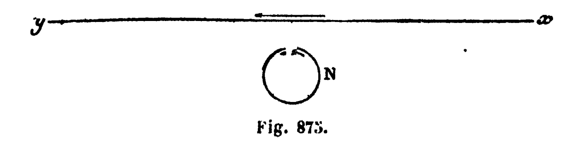


Fig. 875.

Action mutuelle de deux solénoïdes. — Un solénoïde mobile autour d'un axe vertical ayant pris la direction d'une aiguille de dé-

clinaison, on approche de l'un de ses pôles un pôle d'un autre solénoïde (fig. 876) : *les pôles de même nom se repoussent, les pôles de noms contraires s'attirent.*

Les expériences précédentes établissent *l'identité des effets magnétiques d'un aimant et d'un solénoïde.* Les actions à distance des solénoïdes sont celles des aimants et inversement.

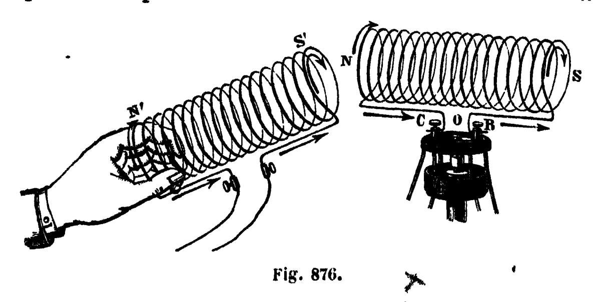


Fig. 876.

742. Déplacement d'un système magnétique dans un champ magnétique. — La loi générale des orientations des courants et des aimants et de leurs actions mutuelles est comprise dans un énoncé unique : un *système magnétique,* aimant ou courant, *mobile, se déplace dans un champ magnétique de telle façon que* **le flux total qu'il embrasse**, compté positivement, par exemple de sa face négative à sa face positive, **devienne maximum.**

Le flux total, embrassé par un système magnétique, comprend deux parties : 1° le *flux propre* au système, allant de sa face sud à sa face nord; 2° le *flux dû au champ magnétique extérieur.*

Exemples. — Un aimant ou un courant, *mobile dans le champ magnétique terrestre,* s'oriente de façon à diriger son propre flux dans le sens du flux terrestre qu'il enveloppe.

D'un courant circulaire, mobile autour d'un axe vertical, approchons un autre courant circulaire vertical soutenu par un support fixe. *Le circuit mobile tend à se placer parallèlement au circuit fixe,* de manière que les deux courants aient le même sens. Le flux, dirigé de la face négative à la face positive du circuit mobile, sera maximum puisqu'il comprendra son flux propre et le flux du circuit parallèle.

Les pôles de noms contraires de deux solénoïdes s'attirent; de cette façon, leurs flux tendent à se diriger *parallèlement et dans le même sens* sur les extrémités en regard.

De même les axes magnétiques de deux aimants libres, en présence, tendent à prendre la même direction et le même sens.

743. Si l'assimilation d'un courant fermé, à un feuillet magnétique, suffit pour expliquer les actions mutuelles des courants et des aimants, il peut être utile de calculer l'action d'un système magnétique sur une portion de courant. Le calcul se fait avec une formule due à Laplace; il conduit au théorème d'Ampère si on l'étend à tout un circuit.

Loi de Laplace. — Une petite portion rectiligne de courant, perpendiculaire à la direction de la force d'un champ magnétique, subit une action électromagnétique, proportionnelle à la *longueur* l du conducteur, à l'*intensité* I du courant et à la *force* H du champ magnétique. — Cette action, $F = \frac{I}{10} lH$ (1), est appliquée au milieu du conducteur et dirigée perpendiculairement au plan du conducteur et de la force magnétique (2) (fig. 877).

Les directions du courant, de la force magnétique et de la force électromagnétique sont trois *droites rectangulaires,* comme les arêtes concourantes d'un cube.

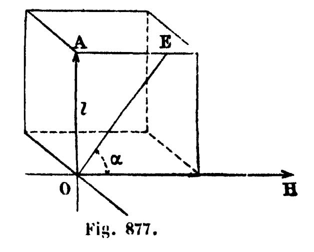


Fig. 877.

D'après la règle d'Ampère, le courant est poussé vers sa droite par la force électromagnétique s'il regarde la région d'où vient la force magnétique, *vers sa gauche s'il regarde dans le sens de la force magnétique* (3).

Si la direction OE du courant fait un angle α avec la force magnétique OH, la force électromagnétique OF reste perpendiculaire au plan du courant et de la force; mais, dans l'expression de F, la longueur l' du conducteur est remplacée par sa projection $l' \sin \alpha$ sur une perpendiculaire à la force magnétique; on a alors $F = \frac{I}{10} Hl' \sin \alpha$.

Si le champ magnétique en O est produit par une masse magnétique μ (fig. 878), placée sur le prolongement de OH, à une distance $Om = r$, la force H du champ magnétique en O est $\frac{\mu}{r^2}$ et $F = \frac{I}{10} \cdot \frac{\mu}{r^2} l' \sin \alpha$.

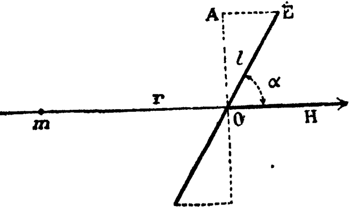


Fig. 878.

Accord de la loi de Laplace et du théorème d'Ampère. — Nous prendrons un exemple.

Orientation d'un cadre rectangulaire vertical (mobile autour d'un axe vertical $O_1 O_2$). — Soit H la direction de la force horizontale terrestre. Si le courant se trouve dans le méridien magnétique, en ABCD, l'action électromagnétique sur le conducteur AB (fig. 879) est une force F

(1) Intensité I en ampères, l en centimètres, H en gauss, F en dynes.

(2) La force magnétique est la force exercée sur un pôle nord (**667**), de masse magnétique égale à l'unité, supposé au milieu du petit courant.

(3) Droite et gauche du courant signifient droite et gauche du nageur d'Ampère.

appliquée au milieu *a;* sur le conducteur CD, c'est une force F' égale, parallèle et contraire, appliquée en *c*. Les actions électromagnétiques sont nulles sur les portions horizontales AD et BC.

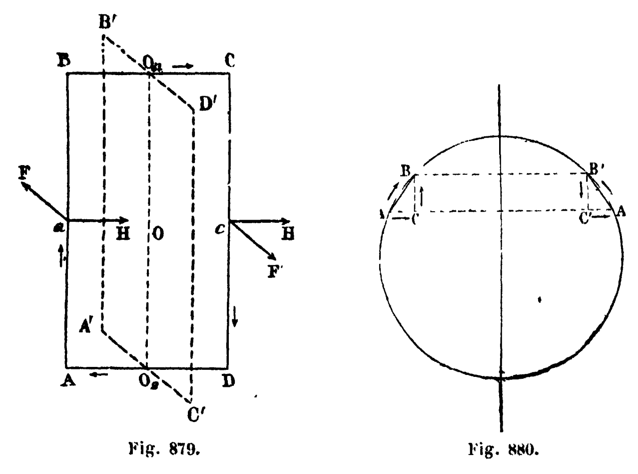


Fig. 879. Fig. 880.

Les forces électromagnétiques exercées sur le cadre par la composante verticale terrestre sont sans effet pour faire tourner le cadre autour de l'axe O_1O_2.

Le couple des deux forces F et F' fait tourner le cadre et l'oriente dans une position A'B'C'D' où il est perpendiculaire à la force magnétique H (1) ou au méridien magnétique; H étant dirigé vers le nord, la partie ascendante se place à l'ouest et la partie descendante à l'est (fig. 879).

La force F a pour valeur $\frac{I}{10}$ H.AB dynes; si le cadre tourne autour de l'axe O_1O_2, le moment du couple moteur est maximum quand le cadre est parallèle à la force magnétique et il est alors égal à F.*ac*. Lorsque le cadre a tourné d'un angle φ, le moment n'est plus que F.*ac*. cos φ.

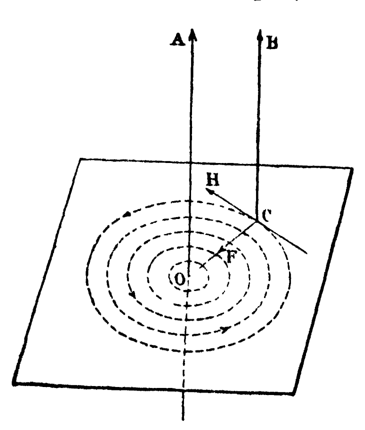


Fig. 881.

Orientation d'un courant circulaire vertical. — Dans le champ magnétique terrestre, un courant circulaire, mobile autour d'un axe vertical, s'oriente dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique, la partie ascendante à l'ouest et la partie descendante à l'est.

Si, en effet, on prend à la même hauteur deux éléments égaux du courant circulaire, AB et A'B' (fig. 880), on peut substituer, à l'un un élément horizontal AC et un élément vertical CB, de même à l'autre, B'C' et C'A'; les actions sur les deux éléments horizontaux sont nulles, les courants verticaux s'orientent comme ceux d'un cadre rectangulaire.

Applications spéciales de la loi de Laplace. — La loi de Laplace est souvent commode pour déterminer le sens d'un phénomène.

Courants rectilignes et parallèles. — Supposons deux courants *de même sens* (fig. 881). En un point d'un plan perpendiculaire à la direction des courants parallèles, la force magnétique due au courant fixe (**736**) est tangente à une circonférence qui a pour centre l'intersection de ce courant avec le plan; en C cette force magnétique est CH, la force électromagnétique exercée sur le courant mobile est CF, elle est attractive et rapproche le courant mobile du courant fixe.

Avec deux courants parallèles *de sens contraires*, la force électromagnétique est encore dirigée suivant le rayon, mais répulsive.

Roue de Barlow (fig. 882). — Un disque de cuivre, mobile autour d'un axe horizontal qui passe par son centre, plonge légèrement par sa circonférence dans une auge M qui contient du mercure. Un aimant à fer à cheval, contourne l'auge et la moitié du disque. La force magnétique est horizontale et va du pôle nord au pôle sud de l'aimant. Un courant arrive par le mercure au pourtour du disque, suit un rayon vertical ascendant et sort par l'axe. La force électromagnétique exercée sur ce courant est dans le plan du disque; elle imprime au disque une rotation continue dans le sens de la flèche F.

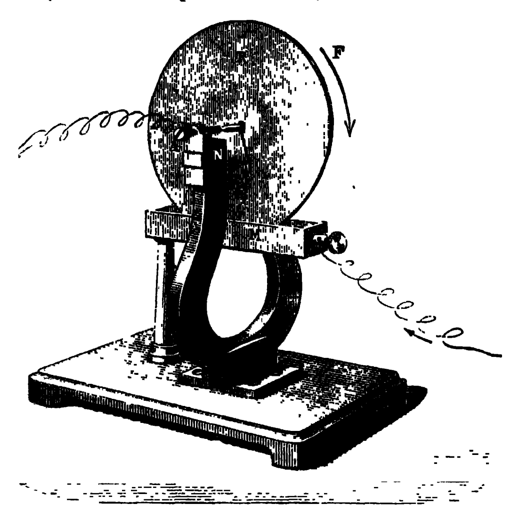


Fig. 882.

Rotation d'un courant horizontal. — Un courant horizontal, mobile autour d'un axe vertical, prend dans le champ magnétique terrestre, un mouvement de rotation continu.

On réalise l'expérience avec un appareil à cuvette (fig. 883). Le courant arrive par une borne A du socle, monte par une colonne centrale isolée de la cuvette et portant un godet à mercure O, il passe du mercure aux parties horizontales OD et OE de l'équipage mobile; il arrive à la cuvette, puis retourne à la pile par la borne B.

Si le courant horizontal s'éloigne de l'axe de rotation, son mouvement a lieu de l'ouest à l'est en passant par le sud; s'il se rapproche de l'axe, le mouvement a lieu de l'est à l'ouest en passant par le nord. Décomposons, en effet, la force magnétique en ses deux composantes horizontale et verticale, H et V. Les actions électromagnétiques de la composante horizontale sont sans action sur OE et OD, car elles sont parallèles à

l'axe de rotation. Les actions dues à la composante verticale sont deux

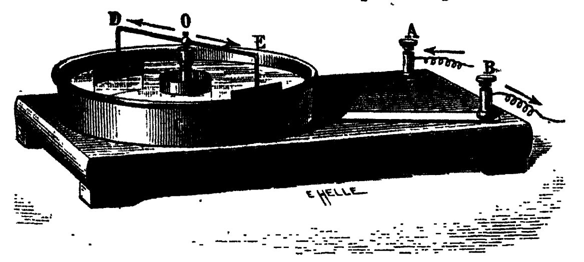


Fig. 883.

forces horizontales appliquées à OE et OD ; elle produisent toutes les deux une rotation de même sens. Les conducteurs verticaux sont très courts, ils sont d'ailleurs parcourus tous les deux par des courants descendants et les forces électromagnétiques produisent des rotations contraires.

Un *multiplicateur circulaire* enroulé sur la cuvette imprime également un mouvement de rotation continu à l'équipage mobile.

Travail des forces électromagnétiques. — 1° Supposons, dans un champ magnétique, un ***courant vertical*** perpendiculaire à la force magnétique et se déplaçant d'une longueur e, suivant la force électromagnétique. L'intensité I étant exprimée en ampères, H en gauss, le travail en ergs est $\frac{I}{10}\,\mathrm{H}le = \frac{\mathrm{HI}s}{10}$; $s = le$ est la surface balayée par le conducteur, $\mathrm{H}s = \Phi$ est le flux de force que le conducteur coupe dans son déplacement ; ce travail est égal, en joules, à $\frac{I}{10^8}\,\mathrm{H}s$ ou $\frac{I\Phi}{10^8}$.

2° Supposons un *cadre* ABCD (fig. 879) qui tourne autour d'un axe O_1O_2, dans un champ magnétique uniforme de force H. Quand le cadre passe de la position ac à la position $a'c'$, le travail de la force électromagnétique F sur l est $\mathrm{F}.aa' \cos\beta$ ou $\frac{I}{10}\,\mathrm{H}l.aa' \cos\beta$ (fig. 884) ; $l.aa'$. cos β est la projection, sur un plan perpendiculaire à la force H, de la surface $l.aa' = s$ décrite par le côté l du cadre dans son déplacement ; le flux de force coupé est $\mathrm{H}s \cos\beta$.

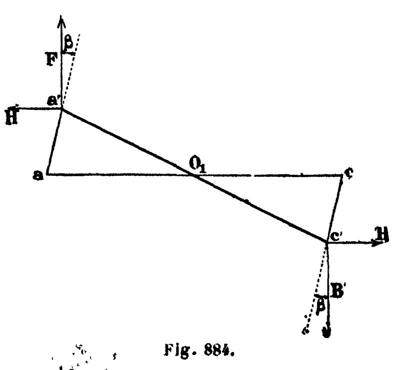


Fig. 884.

Le travail des deux forces est, en joules, $2\mathrm{H}s \cos\beta\ \frac{I}{10^8}$ ou $\frac{I}{10^8}\,\Delta\Phi$; $\Delta\Phi$ est la variation, dans la rotation, du flux de force enveloppé par le cadre.

En général, s'il s'agit d'un *circuit* qui se déplace dans un champ magnétique, le travail des forces électromagnétiques est, en joules, $\frac{I\Delta\Phi}{10^8}$; $\Delta\Phi$ est

la variation, entre les positions extrêmes du déplacement, du *flux de force* magnétique *enveloppé* par le circuit.

744. Rotation d'un courant par un aimant. — Le milieu O de la branche horizontale d'un pont en fil de cuivre repose par une pointe sur un godet à mercure. Le godet prolonge un aimant vertical. Les branches latérales du pont plongent dans une rigole annulaire *r* qui contient du mercure (fig. 885).

D'après le sens des lignes de force N*f*, issues du pôle nord N, le courant CD est porté à gauche (en arrière). Le courant BA (d'après le sens de la ligne de force N*f''*) est porté en avant. CO est porté en arrière, BO est porté en avant.

Les quatre actions concordent et le mouvement du pont est continu (dans le sens de la flèche F).

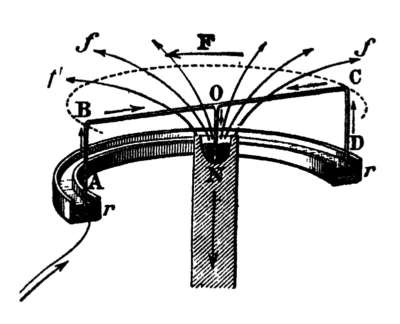


Fig. 885.

ÉLECTRODYNAMIQUE

745. Ampère auquel est due l'assimilation des courants et des aimants avait pris pour point de départ les actions mutuelles des courants. Il avait d'abord réalisé trois expériences fondamentales :

1° **Expérience des courants parallèles.** — *Deux courants parallèles et de même sens s'attirent. Deux courants parallèles et de sens contraires se repoussent.*

Un courant rectangulaire, est soutenu par un support qui lui permet de tourner autour d'un axe vertical. D'une branche

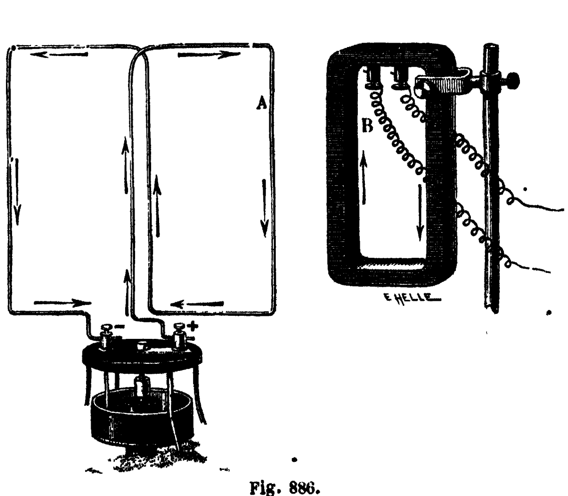


Fig. 886.

verticale A du rectangle on approche un conducteur vertical B traversé par un courant : il y a *attraction* si les deux courants parallèles voisins *sont de même sens, répulsion* s'ils *sont de sens contraires.*

L'action est augmentée lorsque le conducteur fixe est un fil de cuivre isolé, enroulé plusieurs fois sur un cadre (fig. 886). En employant un cadre mobile *astatique,* on évite une action de la Terre.

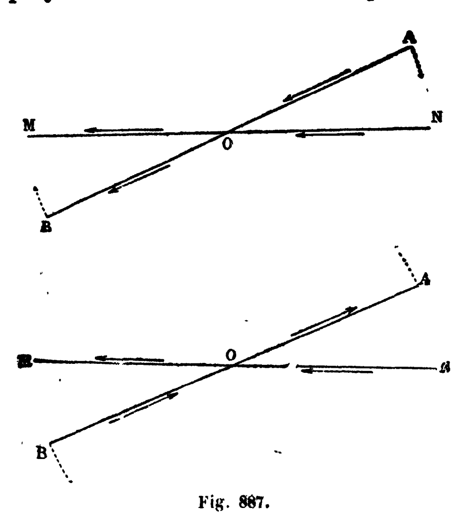


Fig. 887.

2° **Expérience des courants angulaires.** — *Deux courants non parallèles s'attirent, s'ils s'éloignent ou s'approchent tous les deux de leur point de croisement ou de leur perpendiculaire commune; ils se repoussent, si l'un s'en rapproche tandis que l'autre s'en éloigne* (fig. 887).

Employant un cadre mobile (fig. 851), on dispose un conducteur rectiligne au-dessus du côté horizontal supérieur MN et dans un plan horizontal parallèle; le cadre tourne jusqu'à ce que le courant supérieur soit devenu parallèle au courant fixe et de même sens que lui.

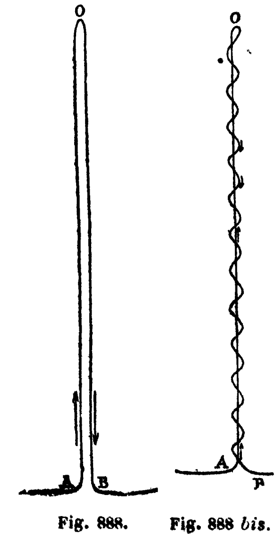


Fig. 888. Fig. 888 *bis.*

3° **Expérience des courants sinueux.** — *Deux courants égaux et de sens contraires produisent des actions égales et contraires dont l'effet total est nul.* En présentant à un conducteur mobile un fil conducteur replié dont les deux branches très voisines sont parcourues par des courants égaux, de sens contraires, le système n'a pas d'action (fig. 888).

Un courant sinueux produit le même effet qu'un courant rectiligne de même intensité et de même sens, ayant les mêmes extrémités, et dont il s'écarte très peu. L'action est nulle si l'un des deux fils du conducteur replié est *un fil sinueux* qui s'écarte

très peu du fil rectiligne (fig. 888 *bis*); les actions d'une partie rectiligne et de la partie sinueuse voisine sont égales.

Les expériences précédentes servent de base à l'explication des actions mutuelles des courants. Prenons, par exemple, un système de deux cadres, ayant chacun plusieurs spires (fig. 906); supposons l'un fixe et parcouru par un courant, et l'autre mobile; quand un courant passe dans le cadre mobile, les deux cadres tendent à se placer parallèlement. Les règles de l'électromagnétisme l'indiquaient, puisque les deux circuits se comportent comme deux aimants, dont les axes magnétiques, perpendiculaires aux plans des cadres, doivent se diriger parallèlement.

Les propriétés des solénoïdes, déduites des actions des courants sur les courants, ayant montré leurs analogies avec les aimants, Ampère a formulé, d'après cette analogie, une théorie de l'aimantation.

746. Assimilation des aimants aux solénoïdes. — D'après Ampère, des courants électriques préexistent autour de chaque particule magnétique. Ces courants, primitivement de *sens divers*, n'exercent pas d'action extérieure. Dans un barreau magnétique, soumis à une influence magnétisante, les courants particulaires s'orientent, sont amenés à circuler tous dans le même sens et leurs plans deviennent parallèles; un aimant se comporte comme un *faisceau de petits solénoïdes* qui ont leurs pôles de même nom à la même extrémité du barreau (fig. 889).

Les *pôles nord* des aimants et des solénoïdes *sont à la gauche des courants*, ou encore, *si l'on se place en face du pôle nord* d'un solénoïde ou d'un aimant, *les courants sont vus circulant dans le sens inverse;* en face du pôle sud, on les voit circuler dans le sens direct.

Dans le fer doux, l'orientation est temporaire et cesse avec l'action magnétisante. Avec l'acier trempé, l'orientation se maintient en partie.

Action extérieure d'un aimant ou d'un faisceau de solénoïdes. — Sur une section perpendiculaire à l'axe magnétique d'un aimant, les courants particulaires se neutralisent dans leurs parties contiguës. Les courants du pourtour extérieur restent seuls efficaces; leur ensemble constitue un courant circulaire unique enveloppant l'aimant (fig. 889). Un aimant *plein* agit *à l'extérieur* comme des courants périphériques, qui sont perpendiculaires à son axe magnétique et forment un solénoïde.

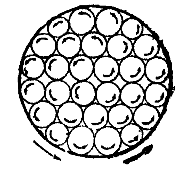


Fig. 889.

L'assimilation d'un aimant à un faisceau de solénoïdes est confirmée par la façon dont se comporte un aimant *creux* (**761**).

747. Les expériences fondamentales d'Ampère ont un grand intérêt historique, mais l'assimilation d'un courant à un aimant est pratiquement plus commode que l'assimilation inverse.

En définitive, les actions électrodynamiques (courants sur courants), et les actions électromagnétiques (courants sur aimants), sont des **actions magnétiques**, puisqu'un conducteur rectiligne traversé par un courant crée autour de lui un champ magnétique. Ces

actions diminuent quand la distance augmente, elles s'exercent à travers des corps non magnétiques : verre, bois, métaux, etc.

GALVANOMÈTRES

Les galvanomètres sont des appareils électromagnétiques qui servent à constater l'*existence* des courants, à en déterminer le *sens* et à en mesurer l'*intensité*.

L'action des courants sur les aimants est utilisée dans les galvanomètres à cadre fixe et à *aimant mobile ;* l'action des aimants sur les courants dans les galvanomètres à aimant fixe et à *cadre mobile*.

GALVANOMÈTRES A AIMANT MOBILE

748. La *déviation* d'une aiguille aimantée *révèle l'existence d'un courant*. On en détermine le *sens* par la règle d'Ampère.

Sans le magnétisme terrestre, l'aimant se mettrait en croix par le moindre courant. Si l'aimant reste soumis à l'action de la Terre, sa déviation *croît avec l'intensité*. La grandeur de la déviation permet de déterminer l'*intensité* du courant.

Avec la disposition d'Œrsted, l'angle d'écart est inappréciable pour un faible courant; on l'augmente par un *multiplicateur*.

Multiplicateur. — Un multiplicateur est un cadre vertical sur lequel s'enroule un grand nombre de fois un fil métallique isolé, traversé par un courant (fig. 890). Au centre du cadre, un aimant est mobile horizontalement autour d'un axe vertical.

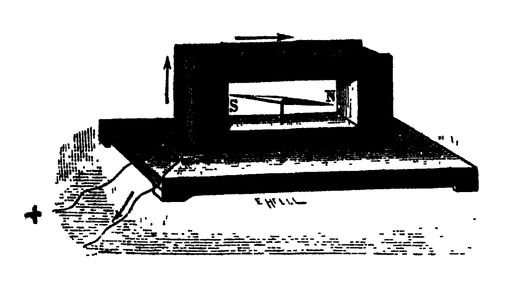


Fig. 890.

L'action est *multipliée*, car toutes les actions du courant concordent pour diriger *du même côté* (**737**) *le pôle nord de l'aimant*.

L'action n'est pas proportionnelle au nombre des spires; car leur distance à l'aimant augmente avec leur nombre; en outre, par sa résistance, le fil enroulé sur le cadre diminue l'effet de chaque spire.

Si le circuit que parcourt le courant est *très résistant*, on n'accroît pas sensiblement la résistance totale, en enroulant sur le cadre

un *grand nombre de spires de fil fin.* Si le circuit est peu *résistant,* le cadre ne doit contenir qu'*un petit nombre de spires* de *gros fil.*

749. Boussole des tangentes. — Au centre d'un multiplicateur circulaire, orienté dans le méridien magnétique, un petit aimant mobile horizontalement est suspendu par un fil de cocon. *L'intensité d'un courant,* qui passe dans le multiplicateur, *est proportionnelle à la tangente de la déviation* de l'aimant.

Démonstration. — Soit MM′ l'intersection du méridien magnétique avec le plan horizontal dans lequel se meut l'aimant (fig. 891). Chacun des pôles A′ et B′ est soumis : 1° à une force F due au courant et perpendiculaire au plan du cadre (1) ; 2° à une force Hμ due à l'action terrestre et parallèle au cadre.

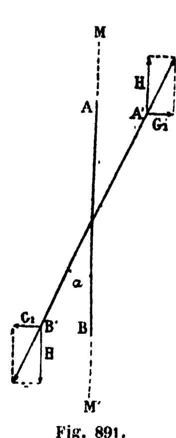


Fig. 891.

Les deux forces F et Hμ, rectangulaires, ont en A′ une résultante ; une résultante égale et parallèle agit sur B′. L'axe magnétique de l'aimant prend la direction commune des deux résultantes.

L'action F, proportionnelle à l'intensité i du courant, peut être exprimée par G$i\mu$, en appelant G l'action exercée sur l'unité de magnétisme par un courant d'une intensité d'un ampère. G dépend des dimensions et de la forme du cadre. La déviation α est l'angle aigu opposé à G$i\mu$, dans un triangle rectangle qui a G$i\mu$ et Hμ pour côtés de l'angle droit : $Gi = H \operatorname{tg}\alpha$, d'où $i = \frac{H}{G} \operatorname{tg}\alpha$.

Avec un autre courant $i' = \frac{H}{G} \operatorname{tg}\alpha'$, d'où $\frac{i}{i'} = \frac{\operatorname{tg}\alpha}{\operatorname{tg}\alpha'}$.

Les *tangentes des déviations* sont donc proportionnelles aux intensités. La *constance* de G pendant la déviation n'est réalisée que pour des cadres de grandes dimensions par rapport à la longueur de l'aimant ou pour des déviations très petites ; en effet, les pôles conservent alors, dans les déviations, la même position par rapport au cadre et l'action des diverses parties du courant reste invariable.

Cas de petites déviations. — Pratiquement, on se borne à de petites déviations que l'on mesure par réflexion (**751**) et on écrit :

$$I = \frac{H}{G}\alpha, \quad I' = \frac{H}{G}\alpha', \quad \text{et par suite :} \quad \frac{I}{I'} = \frac{\alpha}{\alpha'}.$$

Pour un cadre circulaire recouvert de n spires égales, de rayon r,

(1) Un feuillet magnétique, plan, équivalent au courant circulaire, exerce sur un pôle magnétique situé sur son axe, à une distance quelconque, une action perpendiculaire à son plan.

on démontre que $G = \frac{2n\pi}{10r}$, d'où $I = \frac{10rH}{2n\pi}\alpha$.

I est exprimé en *ampères*, r en centimètres et H en dynes.

La *sensibilité* croît lorsque G augmente et que H diminue. G augmente si les spires du cadre sont très rapprochées de l'aimant; on diminue H en réduisant l'action terrestre sur l'aimant.

Aimant astatique. — L'action directrice de la Terre est réduite par un aimant compensateur ou par un système astatique.

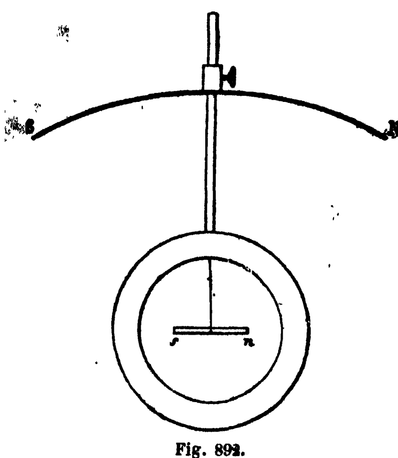


Fig. 892.

Aimant compensateur. — Un barreau aimanté NS contrarie l'action de la Terre (fig. 892). C'est fréquemment un aimant en arc de cercle porté au-dessus du cadre par une tige verticale sur laquelle il glisse. Sa forme permet de placer, au besoin, ses deux pôles en prolongement des deux pôles de l'aimant mobile *ns*.

Système astatique. — L'aimant mobile *ns* est remplacé par un système de deux aiguilles identiques et parallèles, liées à une même tige de cuivre qui réunit leurs milieux; leurs pôles de noms contraires, *a* et *b*, sont en regard, et elles tendent à prendre des orientations opposées (fig. 893). Si leur système était tout entier à l'intérieur du multiplicateur, l'action du courant serait diminuée comme l'action de la Terre, mais l'une des aiguilles est à l'intérieur et l'autre au dessus et en dehors. Les quatre côtés du cadre poussent en avant le pôle nord *a* de l'aiguille intérieure. Sur l'aiguille extérieure, l'action du côté le plus voisin MN est de même sens; vu sa proximité, cette action est supérieure à l'action inverse des trois autres côtés(1).

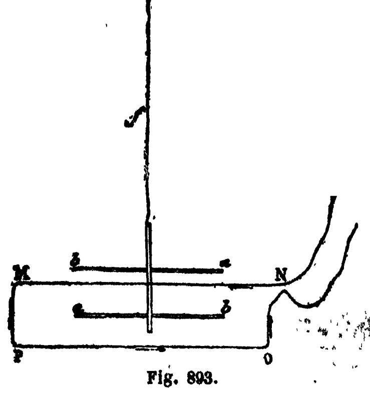
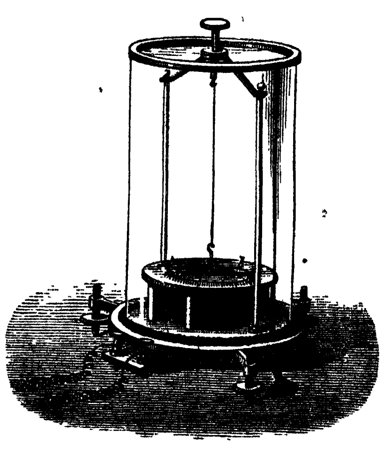


Fig. 893.

(1) Le système serait indifférent à la direction terrestre si les deux aiguilles avaient

750. Galvanomètre de Nobili (fig. 894). — Un cadre, sur lequel est enroulé un fil de cuivre recouvert de soie, supporte un *cercle divisé* que parcourt l'aiguille supérieure d'un système astatique. Les extrémités du fil aboutissent à deux bornes assujetties sur une planchette isolante et auxquelles on relie le circuit.


Fig. 894.

Le système astatique est soutenu par un fil de cocon fixé à un crochet qu'un bouton peut faire monter ou descendre (1).

Réglage. — On soulève les aiguilles et, afin que leur mouvement soit libre, on agit sur les vis calantes du pied de l'instrument jusqu'à ce que la tige qui supporte les aiguilles occupe *le milieu de la fente* qui leur livre passage au centre du cercle. Puis, tournant le cadre, on amène *le zéro* du cercle au-dessous de la pointe de l'aiguille supérieure (2).

Pour déterminer le sens d'un courant, sans avoir à connaître le sens de l'aimantation des aiguilles, on dirige au préalable dans le galvanomètre, un courant de sens connu, que fournit un élément à eau ordinaire, où plongent un fil de zinc et un fil de cuivre.

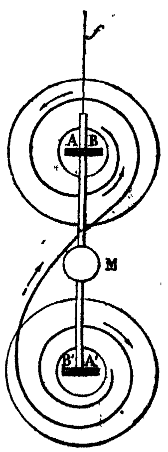


Fig. 895.

Galvanomètre à deux cadres. — On renforce l'action du courant en plaçant chacune des aiguilles du système astatique au centre du cadre d'un multiplicateur. Les deux cadres dévient du même côté le système astatique si le courant les traverse en sens contraires (fig. 895). La tige qui réunit les deux aimants porte un miroir M.

751. Lecture par réflexion. — Il est superflu d'établir, par une graduation, l'intensité du courant qui cor-

---

une aimantation rigoureusement identique ; le moindre courant mettrait les aiguilles en croix avec le cadre. On aimante un peu plus l'une d'elles.

(1) Pour le transport, on fait reposer l'aiguille supérieure sur le cercle divisé.

(2) Sous l'action du courant, l'aiguille du galvanomètre ne se fixe à sa position d'équilibre et ne revient au zéro qu'après de nombreuses oscillations. Pour amortir les oscillations, le cercle divisé sur lequel se déplace l'aiguille supérieure est un disque épais de cuivre dans lequel le mouvement de l'aiguille fait naître des courants d'induction qui s'opposent à son mouvement (780).

répond à chaque déviation, si l'on n'opère que sur de très faibles écarts angulaires. Ces écarts, *proportionnels aux intensités* (**685**), sont amplifiés par réflexion (**448**).

La tige à laquelle est assujetti le système astatique porte un petit miroir concave *m* (fig. 896). Sous une échelle divisée horizontale G[1], soutenue par une colonne S, une *ouverture circulaire* occupe, en face du miroir, le centre

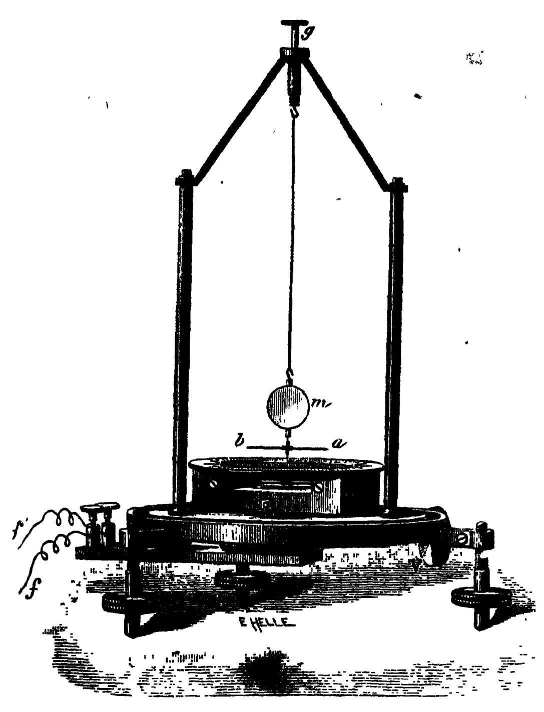


Fig. 896.

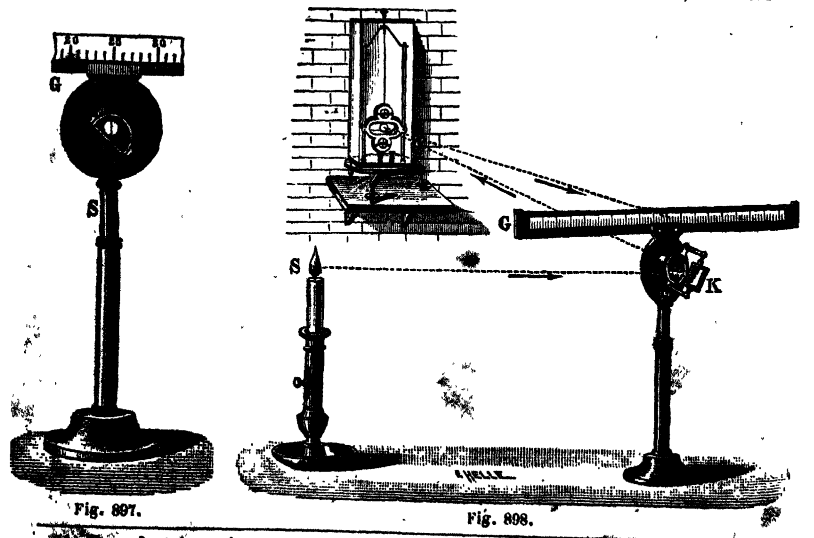


Fig. 897. Fig. 898.

(1) Pour de très petits angles d'écart, une échelle divisée *horizontale* donne sensiblement les mêmes indications qu'une échelle *circulaire* (**360**).

de courbure du miroir concave et laisse passer un faisceau de lumière; un fil fin de platine est tendu verticalement au centre de l'ouverture (fig. 897). Un miroir plan K, mobile autour de deux axes perpendiculaires, dirige le faisceau lumineux sur le miroir concave.

On obtient, par reflexion sur l'échelle transparente G, *un cercle lumineux traversé par un trait noir*, qui est l'image obscure du fil L'image du fil se déplace en même temps que l'aiguille Placé derrière l'échelle, l'observateur suit les déplacements du trait sur les divisions (fig 898)

GALVANOMÈTRES A CADRE MOBILE

752. *Description* (fig. 899) — L'aimant fixe est un aimant en fer à cheval, à branches verticales N et S. Le multiplicateur est un cadre rectangulaire aplati ABCD, recouvert de spires de fil isolé; ce cadre est mobile autour d'un axe vertical, formé par deux fils métalliques fins *f*, tendus en prolongement l'un de l'autre. Ces fils soutiennent le cadre et conduisent le courant. Dans sa position d'équilibre ABCD, au repos, le plan du cadre doit être orienté dans le plan vertical des deux branches de l'aimant.

Fonctionnement. — Si, par les fils de suspension *f*, on fait passer un courant dans le cadre, celui-ci tourne de AB en AB, *pour orienter ses lignes de force parallèlement aux lignes de force de l'aimant* (du pôle nord au pôle sud entre les branches), et il tend à placer sa face nord en regard du pôle sud de l'aimant. De cette façon, le flux de force enveloppé par le circuit serait *maximum* (**742**), le flux du courant ayant le sens du flux magnétique extérieur (fig. 900).

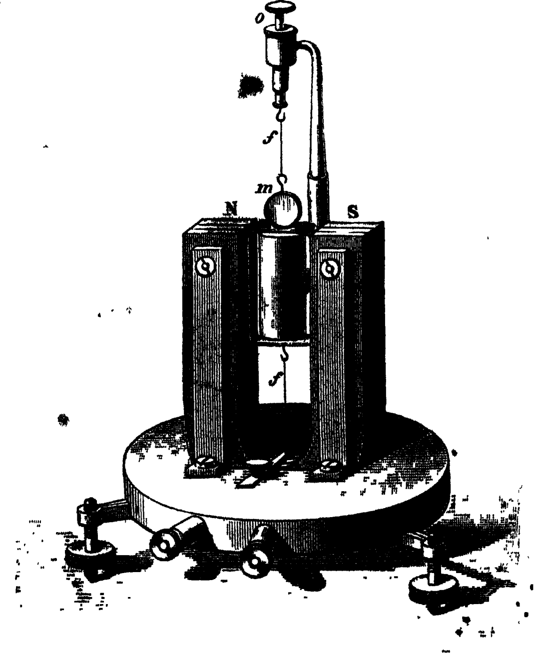


Fig 899.

La *torsion des fils* de suspension, produite par la rotation du cadre, limite la déviation; si elle reste petite, la déviation est sensiblement proportionnelle à l'intensité du courant; on la mesure par réflexion sur un petit miroir *m* fixé au cadre (fig. 899) (1).

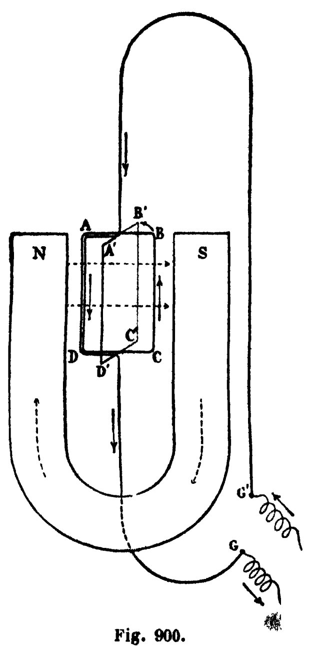


Fig. 900.

Dans le champ magnétique dû à l'aimant, le cadre est soumis à l'action d'un couple dont le moment est $\mathcal{M}$H, $\mathcal{M}$ étant le moment magnétique du cadre traversé par un courant et H l'intensité du champ magnétique. Sous l'action du couple de moment $\mathcal{M}$H, le cadre tourne autour de l'axe de suspension; il s'arrête quand le couple de torsion des fils *f* fait équilibre au couple des forces électromagnétiques.

L'appareil est plus sensible si on dispose, à l'intérieur du cadre, un cylindre vertical de fer doux, soutenu par un support latéral *indépendant*. Le cylindre s'aimante par influence et accroît la force magnétique qui dévie le cadre.

Calcul de l'intensité. — Appelons S la surface d'une spire du cadre mobile, I l'intensité du courant en ampères, H la force magnétique du champ supposé uniforme, C le coefficient de torsion du fil.

Le cadre étant parallèle à la force magnétique, le moment du couple directeur pour l'aimant équivalent au cadre est $\frac{\text{NSHI}}{10}$. Si le cadre est dévié d'un angle α, le moment devient $\frac{\text{NSHI}\cos\alpha}{10}$. Le moment du couple de torsion étant proportionnel à l'angle α de torsion, l'équation d'équilibre est $\text{NSHI}\cos\alpha = 10\text{C}\alpha$; on en déduit I lorsqu'on a déterminé C. Pour de petites déviations, I est proportionnel à α.

Les influences magnétiques extérieures et en particulier l'action terrestre restent sans influence sur les déviations, car leur action sur le cadre mobile est négligeable par rapport à l'action magnétique de l'aimant NS. L'appareil n'a pas besoin d'être orienté.

---

(1) Pendant le déplacement du conducteur mobile, il s'y développe des courants *induits* énergiques (si la résistance totale du circuit est faible). Ces courants *amortissent* les oscillations, car ils s'opposent au déplacement (780), d'après la loi de Lenz. Les courants amortisseurs ne modifient pas la *déviation définitive* d'un galvanomètre, car ils n'existent que pendant le mouvement du système mobile.

753. Emploi des dérivations. — Afin d'éviter le passage de trop forts courants, dans le fil du multiplicateur, on ne dirige souvent dans le galvanomètre qu'une partie connue du courant, en établissant une dérivation entre les bornes B et B′ (fig. 901).

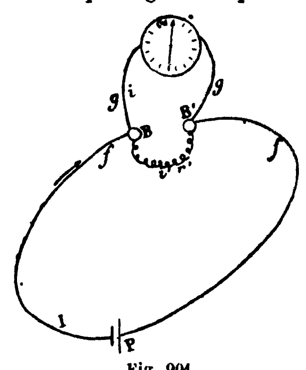


Fig. 901.

Par des dérivations de résistances égales à $\frac{1}{9}$, $\frac{1}{99}$, $\frac{1}{999}$ de la résistance du galvanomètre, on réduit l'intensité dans le cadre à 0,1 ; 0,01 ; 0,001.

Désignons, en effet, par I l'intensité du courant dans la partie principale du circuit, par g la résistance du galvanomètre et intercalons entre les bornes une dérivation $\frac{g}{99}$. Appelons i et i' les intensités des courants dans le galvanomètre et dans la dérivation, les relations :

$$I = i + i',\ ig = i' \frac{g}{99},$$

donnent $i' = 99\,i$.

$$I = i\,(1 + 99)\,^{(1)} \text{ et } i = \frac{I}{100}.$$

Les dérivations sont ajustées sur un socle E (fig. 902). Elles communiquent par a_1, a_2, a_3 à une plaque M qui porte l'une des bornes B du galvanomètre ; une cheville plantée en o_1 ou o_2 ou o_3, fait communiquer l'une des trois autres extrémités avec le disque P et la borne B′ (2).

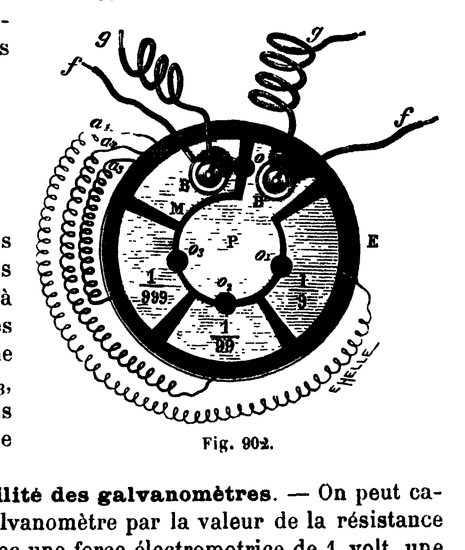


Fig. 902.

Comparaison de la sensibilité des galvanomètres. — On peut caractériser la sensibilité d'un galvanomètre par la valeur de la résistance totale du circuit qui donne, avec une force électromotrice de 1 volt, une déviation de 1 mm. sur une règle divisée placée à un mètre du miroir.

GALVANOMÈTRES INDUSTRIELS

754. Les galvanomètres industriels sont moins sensibles, mais

(1) On peut encore écrire $ig = i'r'$ d'où $\frac{i}{i'} = \frac{r'}{g}$. On en déduit $\frac{i}{i+i'} = \frac{i}{I} = \frac{r'}{r' + g}$. Pour avoir $i = \frac{I}{100}$, on posera $\frac{1}{100} = \frac{r'}{r' + g}$, ce qui donne $r' = \frac{g}{99}$.

(2) Pendant les tâtonnements qui précèdent une mesure, on place la cheville en o, le courant suit alors le chemin sans résistance BoB′, sans traverser le galvanomètre.

plus robustes que les galvanomètres de haute précision. Ils doivent être facilement transportables, fonctionner dans toutes les orientations et ne pas être influencés par des courants ou des aimants voisins. Ils comprennent les **ampèremètres** et les **voltmètres**.

Souvent, les galvanomètres industriels sont formés d'une aiguille de fer doux *aa'* mobile au centre du champ magnétique de deux aimants NS, N'S' (fig. 903); le fer doux s'aimante par influence et se dirige suivant les lignes de force du champ magnétique, c'est-à-dire parallèlement à la ligne des pôles. Autour du fer doux, un fil conducteur est enroulé sur une bobine B; en traversant ce fil, un courant tend à diriger l'axe du fer doux suivant l'axe de la bobine, L'action des aimants contrarie l'action du courant, et limite la déviation.

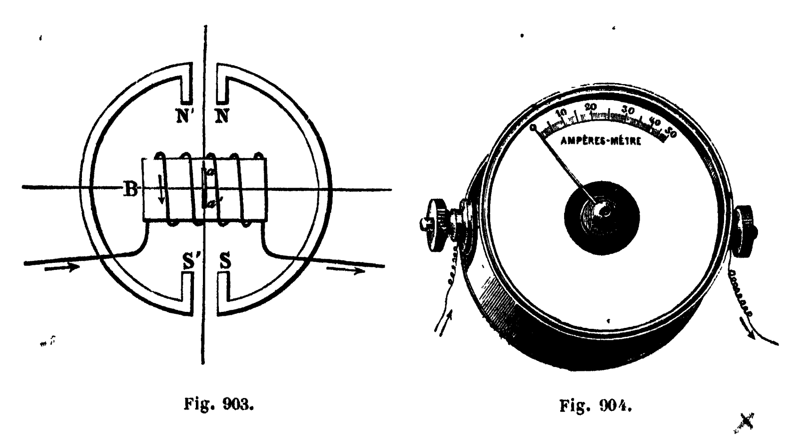


Fig. 903. Fig. 904.

755. Ampèremètres (fig. 904). — Un ampèremètre est un *galvanomètre peu résistant,* gradué en *ampères.* Intercalé dans un circuit, il ne modifie pas d'une façon appréciable le débit à mesurer.

La graduation se fait en dirigeant des courants constants, à la fois dans l'ampèremètre et dans un voltamètre à azotate d'argent. Le poids p d'argent déposé en t sec. donne l'intensité I en ampères, d'après la relation $It = p\,\frac{96\,600}{108}$; on note la déviation de l'ampèremètre.

756. Voltmètres. — Un voltmètre est un *galvanomètre dont la résistance est très grande.* Il est gradué en *volts*

Si la résistance r du voltmètre introduit dans un circuit est très grande par rapport à la résistance totale r' du reste du circuit, le dénominateur de l'équation d'Ohm $I = \frac{E}{r + r'}$, reste sensiblement égal à r quand on fait varier l'élément de pile. Les *intensités* I et I' observées successivement avec deux éléments différents sont sen-

siblement *proportionnelles aux forces électromotrices* E et E′ des éléments. On gradue le voltmètre en **volts** avec des piles de forces électromotrices connues [1].

Un voltmètre remplace un électromètre pour la mesure des ***différences de potentiel*** entre deux points A et B d'un circuit.

Au lieu d'introduire le voltmètre dans le circuit lui-même, on le place en G (fig. 905), ***en dérivation*** entre A et B; le produit rI de l'intensité I du courant en ampères, dans la dérivation [2], par la résistance r du voltmètre en ohms, est égal à la différence de potentiel $a - b$ en volts entre A et B (**741**).

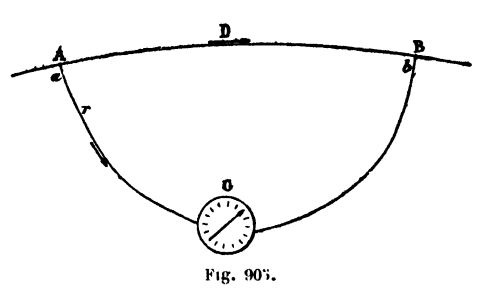


Fig. 905.

La différence de potentiel obtenue n'est pas celle qui existait avant la mise en dérivation du galvanomètre, car l'ensemble ADB et AGB est moins résistant que ADB. Mais si le fil du galvanomètre offre une très grande résistance par rapport à ADB, l'intensité en ADB et la différence de potentiel entre A et B n'ont pas varié sensiblement.

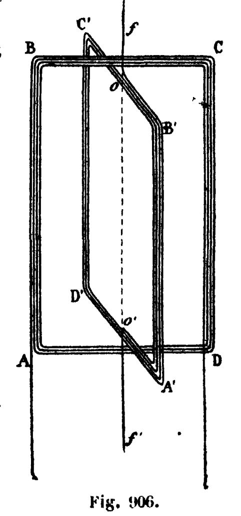


Fig. 906.

757. Electrodynamomètre. — Un courant passe dans deux cadres, l'un extérieur ABCD fixe, l'autre intérieur A′B′C′D′, mobile autour de la verticale oo' qui est l'axe commun des cadres (fig. 906). L'action mutuelle des cadres tend à les rendre parallèles, la déviation α du cadre mobile est limitée par la torsion du fil métallique ff' qui le soutient.

La force magnétique due au cadre fixe est A.I, le moment du couple exercé sur le cadre mobile est $A.I.S.I = ASI^2$, et, lors de l'équilibre, il est égal au moment $K\alpha$ du couple de torsion (**752**).

Le sens de la déviation reste le même quand le courant change à la fois de sens dans les deux cadres et l'électrodynamomètre peut servir à mesurer l'intensité de courants alternatifs.

758. Wattmètre. — Un wattmètre mesure la puissance d'un courant entre deux points A et B d'un circuit. Si la différence de potentiel entre ces deux points est E volts et l'intensité du courant I ampères, la puissance

(1) Le courant qui traverse un voltmètre est très faible et chacune des spires n'exerce pour sa part qu'une très petite action, mais comme le cadre est recouvert d'un grand nombre de spires, la déviation peut être aussi grande que dans un ampèremètre.

(2) On a fait passer préalablement dans le voltmètre des courants dont les intensités étaient connues et on a noté les déviations correspondantes.

est le produit EI en watts (1). I peut être donné par un ampèremètre placé entre A et B, E par un voltmètre en dérivation sur A et B.

Un *wattmètre* est un électrodynamomètre; la bobine fixe reçoit tout le courant et sert d'*ampèremètre;* la bobine mobile, très résistante, en dérivation entre A et B, sert de *voltmètre*. L'action mutuelle est proportionnelle à EI. L'instrument est gradué en watts.

759. Ampèremètre thermique. — En traversant un fil conducteur d'une résistance de R ohms, un courant d'une intensité de I ampères y développe en t sec. $\frac{RI^2t}{4,18}$ calories qu'on pourrait mesurer dans un calorimètre; on aurait I, si R est connu. Comme une mesure calorimétrique est longue, on se contente d'observer la dilatation du fil, qui entraîne une aiguille indicatrice. En notant les déviations de l'aiguille pour des courants de 1, 2..... 10 ampères mesurés avec un *ampèremètre ordinaire,* l'ampèremètre thermique est étalonné par comparaison. L'échauffement étant indépendant du sens du courant, un ampèremètre thermique convient aux courants continus et aux courants alternatifs.

Voltmètre thermique. — Entre deux points A et B d'un circuit dont la différence de potentiel en volts est E, on établit une dérivation de R ohms; il s'y dégage en t sec. $\frac{E^2t}{4,18\ R}$ calories. Au lieu de mesurer cette chaleur dans un calorimètre pour obtenir E, on observe sur une aiguille indicatrice la dilatation d'un fil métallique qui forme une faible partie de la résistance R. Le voltmètre est étalonné en volts par comparaison avec un voltmètre ordinaire.

Les appareils thermiques sont indifférents aux phénomènes électriques et magnétiques extérieurs. Pour les courants alternatifs, ils ne présentent pas de self-induction.

UNITÉS ÉLECTRIQUES

760. Unités principales. — Les grandeurs le plus fréquemment employées en électricité sont au nombre de cinq : ***intensité, quantité, force électromotrice, résistance, capacité.*** Leurs mesures sont représentées par les lettres I, M, E, R, C. Les noms de leurs unités rappellent les physiciens qui ont le plus contribué au développement de la science électrique (*Ampère, Coulomb, Volta, Ohm* et *Faraday*).

Les unités choisies ont supprimé les coefficients de proportion-

(1) La puissance en watts, entre A et B, est aussi I^2R (I en ampères et R en ohms). On pourrait mesurer avec un calorimètre le nombre équivalent de calories.

nalité dans les relations : $M = It$, $EIt = T$ (en joules), $I = \frac{E}{R}$, $M = CV$.

L'**ampère**, unité d'intensité, est *l'intensité d'un courant constant* qui met en liberté, par seconde, $\frac{1}{96\,600}$ de gramme d'hydrogène ou qui dépose $\frac{108}{96\,600}$ gramme d'argent ($1^{mg},118$).

Le ***coulomb***, unité de quantité, est *la quantité d'électricité* qui dépose, en un temps quelconque, $1^{mg},118$ d'argent. Un courant d'un ampère, d'après la relation $M = It$, débite un coulomb par sec.

On appelle ***ampère-heure*** la quantité d'électricité fournie, en une heure, par un courant constant d'un ampère (3600 coulombs).

D'après la relation, $EIt = EM$, le ***volt***, unité de force électromotrice. est *la force électromotrice* d'une pile qui développe dans son circuit un travail d'un joule pour un débit d'un coulomb.

D'après la loi d'Ohm $I = \frac{E}{R}$, l'***ohm***, unité de résistance, est *la résistance* d'un circuit qui laisse passer un ampère quand la force électromotrice de la pile est un volt. Un ohm est représenté par une colonne de mercure pur, à 0^0, de 1 mm^2 de section et de 106,3 cm. de longueur. Un *megohm* vaut un milliond'ohms (1).

Le ***farad***, unité de capacité, est d'après la relation $M = CV$, *la capacité* d'un conducteur qu'une charge d'un coulomb porte à un potentiel d'un volt. Un *microfarad* est la millionième partie d'un farad. On le représente matériellement par un condensateur.

A ces cinq grandeurs il convient de joindre la masse magnétique.

L'unité de magnétisme est, d'après la loi de Coulomb, $F = \frac{\mu\mu'}{d^2}$, la quantité de magnétisme d'un pôle qui exerce sur un pôle identique, distant de un centimètre, une action égale à 1 dyne.

L'ampère, tel qu'il a été défini, est aussi, d'après la relation $\mu l = \frac{sI}{10}$, l'intensité d'un courant qui parcourt le contour d'une surface d'un cm^2 et équivaut à un aimant dont le moment μl est $\frac{1}{10}$, le magnétisme μ des pôles de l'aimant étant exprimé en unités de magnétisme et la distance l des deux pôles en cm. Dans l'expression d'une force électromagnétique $F = \frac{I}{10}\,lH$, F et H représentent des dynes, l des cm., I des ampères.

(1) Si l'ohm est défini matériellement par une colonne de mercure, on peut dire qu'un *volt* est la différence de potentiel entre deux points d'un conducteur parcouru par un courant d'un *ampère*, lorsque la résistance comprise entre les deux points est un *ohm*.

AIMANTATION PAR LES COURANTS

761. Aimantation par un courant. — Un corps magnétique s'aimante dans le champ magnétique d'un courant électrique; *l'axe magnétique de l'aimant formé est dirigé suivant les lignes de force du champ.*

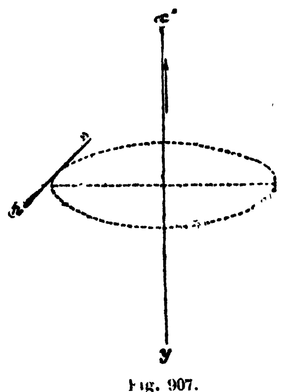


Fig. 907.

Une aiguille d'acier, mise en croix avec un courant électrique, est transformée en un aimant dont les pôles ont la position que prendraient les pôles d'un aimant libre soumis à l'action du courant; *le pôle nord* de l'aimant créé est *à la gauche du courant* (fig. 907).

On détermine une aimantation plus énergique en introduisant le barreau dans un tube de verre sur lequel est enroulé en hélice un fil traversé par un courant; toutes les spires agissent en concordance (**748**); l'aimantation augmente jusqu'à une certaine limite avec le nombre des spires et avec l'intensité du courant. L'axe magnétique de l'aimant est parallèle à l'axe de l'hélice, comme les lignes de force du champ magnétique.

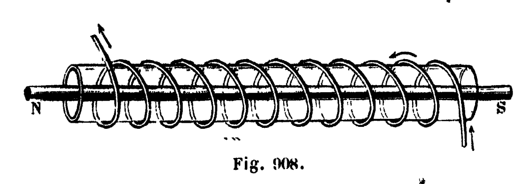


Fig. 908.

Les pôles de l'aimant ont le signe des pôles des mêmes extrémités de la bobine magnétisante (fig. 908). *Le pôle nord de l'aimant se trouve à l'extrémité nord de la bobine.*

Points conséquents. — Si, après avoir d'abord enroulé le fil conducteur dans un sens, on change le sens en N (fig. 909), une aiguille d'acier placée dans le tube pendant le passage du courant présente, outre les pôles des extrémités, autant de régions d'attraction pour la limaille ou de points conséquents qu'il y a de changements de sens.

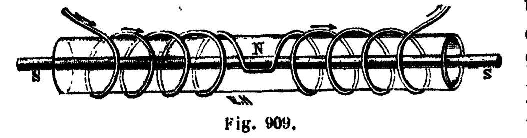


Fig. 909.

Aimantation du fer doux. — Un barreau de *fer doux* placé

à l'intérieur d'une bobine parcourue par un courant, s'aimante; mais son aimantation cesse instantanément avec le courant.

Constitution d'un aimant creux. — Un cylindre de fer doux placé à l'intérieur d'un solénoïde s'aimante comme le solénoïde (fig. 911) : son pôle sud se trouve à la même extrémité que le pôle sud du solénoïde. Le même fer introduit dans un aimant creux s'aimante en sens inverse de l'aimant.

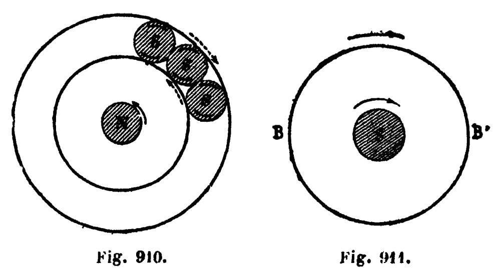


Fig. 910. Fig. 911.

Cette différence confirme l'assimilation d'un aimant à un faisceau de solénoïdes (**746**). Les courants intérieurs de l'aimant creux, les plus voisins du cylindre de fer, sont en effet opposés aux courants extérieurs (fig. 910).

Le sens des lignes de force, qui détermine le sens de l'aimantation, est opposé à l'intérieur du solénoïde (en *ab*) (fig. 912) et à l'intérieur d'un aimant creux (en *a'b'*) (fig. 913).

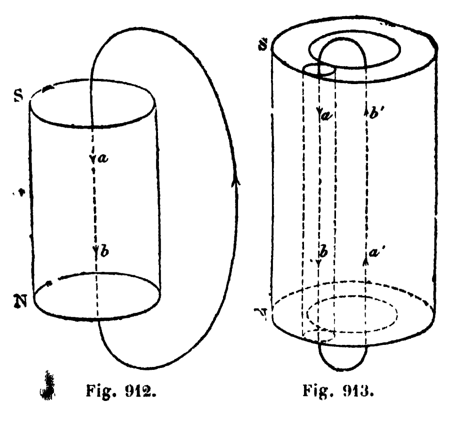


Fig. 912. Fig. 913.

762. Électroaimants.

— Les électroaimants sont des aimants *temporaires*. Un électroaimant est *un noyau de fer doux sur lequel est enroulé un fil de cuivre* isolé. Quand un courant passe dans le fil, un pôle nord prend naissance dans le noyau, à l'extrémité nord de la bobine, un pôle sud à l'extrémité sud. L'aimantation *cesse avec le courant;* elle change de sens avec lui.

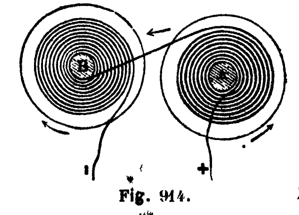


Fig. 914.

Dans les électroaimants **en fer à cheval,** un fil de cuivre isolé s'enroule sur chacune des extrémités et passe d'une branche à l'autre sans recouvrir la partie courbe. L'enroulement a lieu sur les deux branches de façon que les actions soient concordantes ; il paraît de sens contraire à un observateur qui voit à la fois les deux pôles (fig. 914) ; *sur le noyau redressé, le sens est le même.*

Les électroaimants acquièrent une aimantation bien supérieure à

celle des aimants d'acier et produisent les champs magnétiques les plus intenses. Leur aimantation est *modifiée à volonté,* en ouvrant, fermant, diminuant, augmentant, renversant le courant.

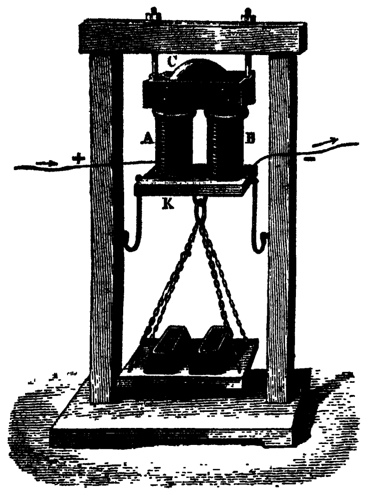


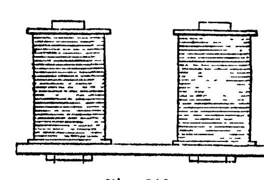
Fig. 915.

On montre la puissance des électroaimants en appliquant sur les deux pôles une armature de fer doux K ou *contact,* à laquelle on fait porter une charge considérable pendant l'aimantation (fig. 915).

Au lieu de courber en fer à cheval le fer de l'électroaimant, on se contente souvent de fixer sur une traverse de fer doux, appelée *culasse,* deux noyaux de fer doux parallèles entre eux (fig. 916). On enroule le fil sur chacun des noyaux.

Une fois l'aimantation établie, la dépense du courant est la même pour la bobine, avec et sans le noyau de fer doux.

Magnétisme rémanent. — L'acier, et spécialement l'acier trempé, conserve une notable partie de son aimantation. Le fer d'un électroaimant, surtout s'il n'est pas très pur, conserve aussi une petite aimantation. Quand une armature est en contact direct avec le noyau, le magnétisme *rémanent* l'empêche de se détacher à l'ouverture du circuit. On évite cette adhérence *en interposant une mince feuille de carton* entre le noyau et l'armature.


Fig. 916.

763. Loi des électroaimants. — L'aimantation n'augmente pas indéfiniment avec l'intensité du courant. Lorsqu'il a son maximum d'aimantation, un barreau magnétique est dit *saturé.*

Quand le noyau d'un électroaimant est loin de la saturation, son intensité d'aimantation est proportionnelle à la force magnétisante de la bobine. La *force magnétisante* est proportionnelle au produit de l'*intensité* du courant par le *nombre* N de spires, elle est indépendante de la section et de la nature du fil. Un courant de 25 ampères circulant dans 4 spires développe la même force magnétisante qu'un ampère parcourant 100 spires.

Choix du fil d'un électroaimant. — Dans un circuit de force électromotrice et de résistance données, l'accroissement du nombre des spires n'augmente pas toujours la puissance d'un électroaimant. Avec un circuit extérieur très résistant, l'accroissement de la résistance du fil de l'électroaimant ne diminue que faiblement l'intensité et il y a avantage à employer des bobines magnétisantes à fil long et fin. Dans un circuit peu résistant, l'effet magnétisant diminue si l'on accroît trop le nombre des spires.

764. Flux de force d'un électroaimant. — L'introduction

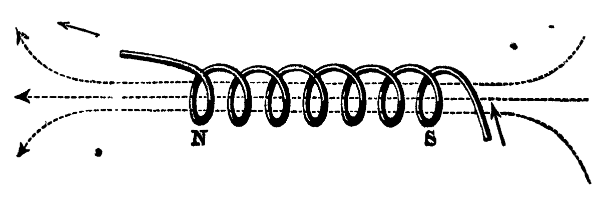


Fig. 917.

d'un noyau de fer doux dans une bobine parcourue par un courant *augmente le flux de force* (fig. 917 et 918).

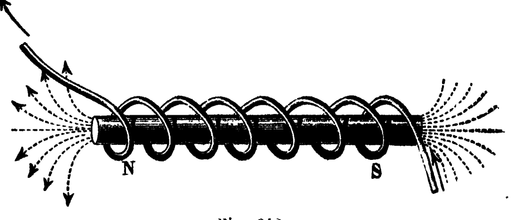


Fig. 918.

Si le noyau de fer a un diamètre suffisant pour remplir exactement la bobine, on appelle *perméabilité magnétique du fer* le rapport μ du flux qui traverse la bobine lorsqu'elle renferme le noyau au flux qui la traversait avant l'introduction du noyau. La perméabilité de l'air est ainsi égale à l'unité.

Dans un électroaimant rectiligne, le flux par cm² est $B = \mu H$; H est la force magnétique ou magnétisante dans la bobine sans noyau. Le flux qui traverse la section S est μHS.

Pour les corps peu magnétiques, μ est constant. Pour le fer, loin de la saturation du noyau, μ est également constant; il décroît quand on approche de la saturation. A la saturation, $\mu = 1$, c'est-à-dire que le flux est égal à celui qu'on aurait avec un solénoïde sans noyau (1). C'est pour le fer doux que μ a sa plus grande valeur; elle varie entre 100 et 2500.

(1) Quand la force magnétique, à l'intérieur d'une bobine sans noyau est 2 gauss, le flux qui la traverse est 2 par centimètre carré; si, par l'introduction d'un noyau de fer, le flux est porté à 4500, le coefficient μ est égal à 2250. Quand la force magnétique est très élevée, par exemple de 10000 gauss, $\mu = 1$, c'est-à-dire que le flux par centimètre carré est égal à 10000, avec et sans noyau de fer.

765. Hystérésis. I. Quand on soumet un barreau de fer *qui n'a jamais été aimanté,* à des forces magnétisantes qui croissent de 0 à H, et qu'on porte en ordonnées les *intensités d'aimantation* (quotients du moment magnétique par le volume), le point figuratif de cette intensité passe de 0 à A. L'ordonnée *a*A est l'intensité d'aimantation du barreau saturé, pour une valeur de H égale à O*a*.

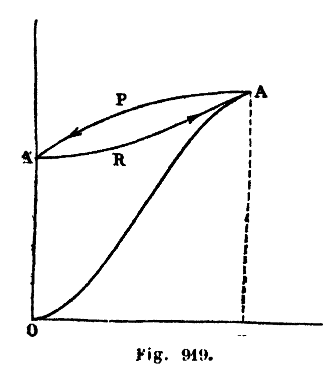


Fig. 919.

Si la force magnétisante décroît ensuite de H à 0, le point figuratif suit une courbe de retour APA′ (fig. 919); il revient en A′ quand la force magnétisante s'annule. Si l'on fait, dès lors, osciller la force magnétisante de 0 à H, puis de H à 0, le point figuratif décrit un *cycle fermé* A′RAPA′ (fig. 919); la courbe du cycle a des ordonnées plus élevées dans la période de retour que dans la période d'aller. OA′ représente le *magnétisme rémanent.*

II. Dans les ***machines à courants alternatifs,*** le champ magnétique est renversé périodiquement et la force magnétisante varie entre des valeurs extrêmes, de signes contraires, de + H à — H et de — H à + H. La première intensité d'aimantation, quand la force magnétisante croît de 0 à + H, est représentée par une courbe OA; on a ensuite une série de courbes qui *se répètent* en un *cycle* (fig. 920), la courbe de désaimantation étant plus élevée que la courbe d'aimantation. OC représente le *magnétisme rémanent.*

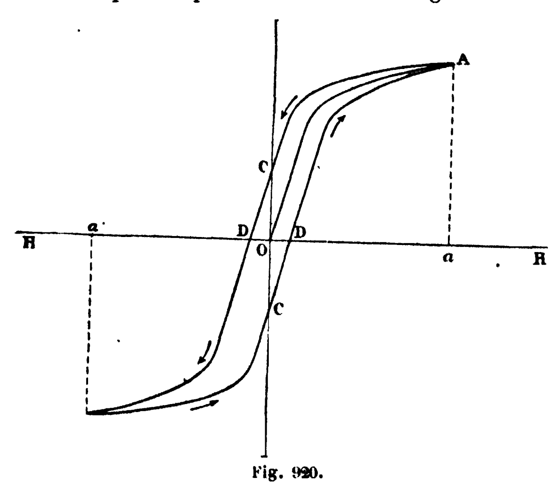


Fig. 920.

Dans ces alternatives d'aimantation et de désaimantation, le noyau magnétique s'échauffe. Il en résulte une *perte d'énergie* proportionnelle à l'aire du cycle et au volume du métal. Cette perte, empruntée au courant électrique, est atténuée en choisissant une qualité de fer pour laquelle le cycle embrasse l'aire la plus petite et en n'atteignant pas des forces magnétisantes très élevées.

Ces phénomènes constituent ce qu'on appelle l'*hystérésis.*

766. Circuit magnétique. — Les lignes de force des électroaimants forment des courbes *fermées.* Le flux de force Φ qui parcourt un *circuit magnétique* est le même dans tout le circuit.

Un noyau magnétique, en forme de *tore* ou *d'anneau*, entouré de spires magnétisantes, constitue un *circuit magnétique fermé*. A l'intérieur de l'anneau, le flux magnétique est $\Phi = \mu SH$. N étant le nombre total de spires, L la longueur de la circonférence moyenne de l'anneau,

$$H = \frac{4\pi N}{L} \cdot \frac{I}{10} \quad \text{et} \quad \Phi = \frac{4\pi}{10} \cdot \mu S. \frac{NI}{L} = 1{,}25 \, \mu S \, \frac{NI}{L}.$$

En écrivant $\Phi . \frac{L}{\mu S} = 1{,}25$ NI, on a une relation de la même forme que la loi d'Ohm ; 1,25 NI s'appelle *force magnétomotrice*, $\frac{L}{\mu S}$ est la résistance magnétique ou *réluctance*. *Un flux magnétique est ainsi le quotient d'une force magnétomotrice par une réluctance.*

La comparaison avec la loi d'Ohm est naturelle, car un flux magnétique est indépendant de la répartition sur l'anneau des N spires qui produisent la force magnétomotrice, de même qu'un courant électrique a une intensité indépendante de la distribution des forces électromotrices échelonnées le long de son circuit.

Les lignes de force suivent sans fuites un anneau de fer et un électroaimant en anneau n'exerce aucune action magnétique extérieure. Si l'anneau présente une coupure ou *entrefer*, le circuit magnétique est ouvert et les faces en regard de l'entrefer forment des pôles avec magnétisme libre. Il y a alors des fuites de flux et en même temps des actions magnétiques vers l'extérieur. Le circuit se ferme à travers la coupure ; la réluctance totale, somme des réluctances $\Sigma \frac{l}{\mu S}$, est ici $\frac{l}{\mu S} + \frac{\varepsilon}{S}$. Par sa faible perméabilité, un intervalle d'air ε réduit dans une forte proportion le flux qui parcourt un circuit magnétique, et il faut plus d'ampères tours pour obtenir le même flux qu'avec l'anneau fermé (1).

Différence entre un aimant et un électroaimant. — Dans un aimant permanent, le flux magnétique est fixe. Quand on approche une armature d'un aimant permanent en fer à cheval, le flux de force suit l'armature au lieu de s'épanouir dans l'air à la sortie des branches.

Dans le cas d'un électroaimant, pour une force magnétisante constante, le flux n'est pas fixe. Quand on approche une armature d'un électroaimant, la diminution qu'éprouve la résistance magnétique du circuit augmente le flux qui traverse le noyau.

APPLICATIONS DES ÉLECTROAIMANTS

A cause de la propriété qu'ils ont de s'aimanter par le passage d'un courant et de se désaimanter quand le courant est interrompu,

(1) Lorsqu'un électroaimant en fer à cheval est construit *pour attirer un contact à distance*, le flux magnétique est diminué par la résistance des entrefers, on accroît alors le nombre d'ampères tours, ce qui fait allonger l'électroaimant et écarter les branches pour loger une grande longueur de fil.

les *électroaimants sont les organes les plus employés* de l'électricité industrielle. Ils sont appliqués à soulever des fardeaux dans les ateliers et dans les usines métallurgiques ; ils sont particulièrement utilisés pour la transmission des signaux.

767. Sonnerie électrique à trembleur (fig. 921). — Une sonnerie électrique se compose d'un électroaimant à fer à cheval et d'une armature à marteau qui peut frapper un timbre.

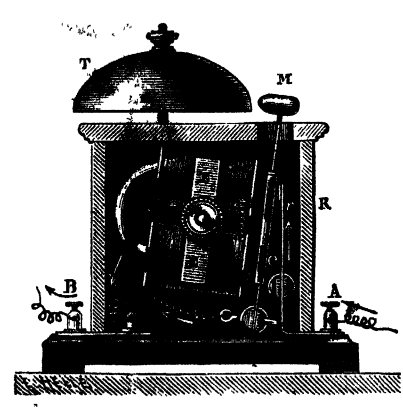


Fig. 921.

Description. — L'électroaimant E est assujetti sur une planchette. En face de ses pôles, est disposée une armature de fer doux *e* que porte une lame métallique élastique fixée inférieurement. L'armature se prolonge par une tige munie du marteau M. Au repos, la lame élastique maintient le fer doux appuyé contre un ressort *r* qui le fait communiquer avec l'un des pôles d'une pile. La lame élastique communique avec l'autre pôle de la pile par le fil de l'électroaimant.

Fonctionnement. — Quand le circuit de la pile est fermé, le courant arrive en A, *passe du ressort r à la pièce de fer e*, traverse le fil de l'électroaimant et retourne à la pile par B ; le passage du courant excite l'électroaimant, le fer *e attiré s'écarte du ressort r*. Le courant étant interrompu, l'électroaimant se désaimante et l'attraction cesse. La lame élastique rétablit le contact entre le fer et le ressort, et ferme de nouveau le circuit. Par le jeu de cet *interrupteur à trembleur*, les chocs se succèdent contre le timbre.

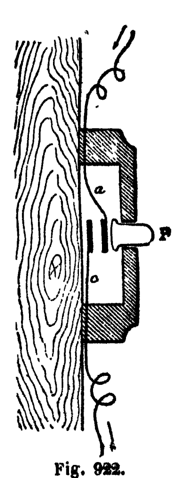


Fig. 922.

Pour faire fonctionner une sonnerie d'un point situé à distance, on fait passer en ce point le circuit d'une pile qui présente une coupure entre *a* et *c* (fig. 922) ; on produit un appel, en appuyant sur un *bouton* P qui ferme le circuit en mettant en contact les deux tronçons *a* et *c* du fil.

Une même sonnerie est commandée par des boutons B placés respectivement dans les différentes pièces d'un appartement (fig. 923).

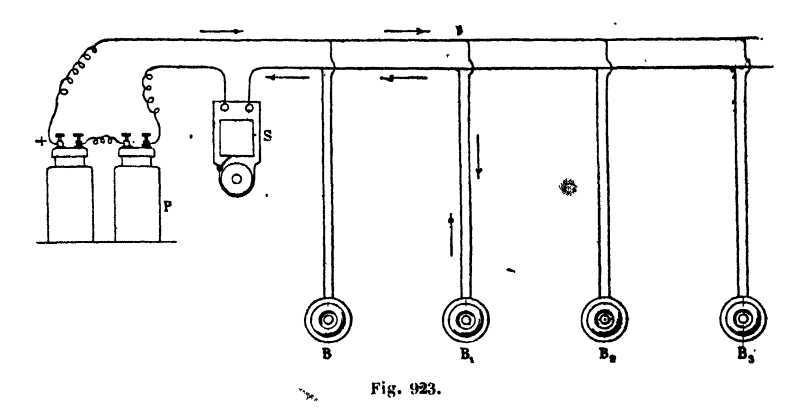


Fig. 923.

768. Télégraphie électrique. — C'est sur le fait de l'aimantation *intermittente* du fer doux, par fermeture d'un courant et par son ouverture, qu'est basé le télégraphe électrique.

L'ensemble d'un télégraphe comprend : 1° une *pile;* 2° des *fils de ligne* entre les stations; 3° un *manipulateur* au départ pour transmettre les signaux; 4° un *récepteur*.

Pile. — Les piles sont formées d'un grand nombre d'éléments constants, tels que des éléments Daniell disposés en série. La résistance des éléments est sans inconvénient, car le circuit télégraphique est lui-même très résistant (**697**).

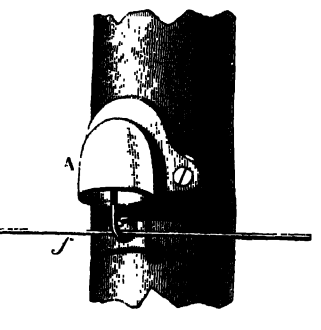
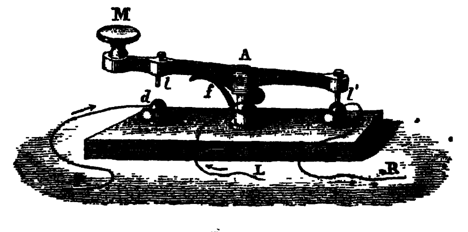


Fig. 924.

Fil de ligne. — Le fil de ligne *f* réunit le manipulateur du départ au récepteur de l'arrivée. Il est fixé sur des poteaux (fig. 924) à l'aide de pièces isolantes A en porcelaine.

Au lieu de fil de cuivre dont la résistance à la rupture est insuffisante, le fil de ligne a été longtemps en fer galvanisé; actuellement, on se sert surtout d'alliages de cuivre.



Manipulateur (fig. 925). — Le manipulateur ou interrupteur est un levier métallique mobile autour d'un axe A qui est en communication permanente avec le fil de ligne L; une borne *d,* fixée sur le socle de l'appareil,

communique avec le pôle positif de la pile. Un ressort *f* maintient le levier à distance de la borne *d*. Quand on appuie sur la poignée M, une pointe métallique *l* touche *d* et ferme le circuit.

Récepteur Morse (fig. 926). — L'appareil qui inscrit, à la station d'arrivée, les signaux envoyés par le manipulateur se compose d'un levier horizontal MN, dont une extrémité porte une pièce de fer doux D qui sert d'*armature* à un électroaimant vertical. Le levier oscille autour d'un axe fixe O et se termine par une pointe recourbée *p*. Quand un courant passe dans l'électroaimant, celui-ci s'aimante, *attire l'armature;* la pointe *p* est soulevée contre un ruban de papier AC emmagasiné sur un dévidoir. Le papier est entraîné entre deux cylindres pleins E et F, qui tournent en sens contraires autour

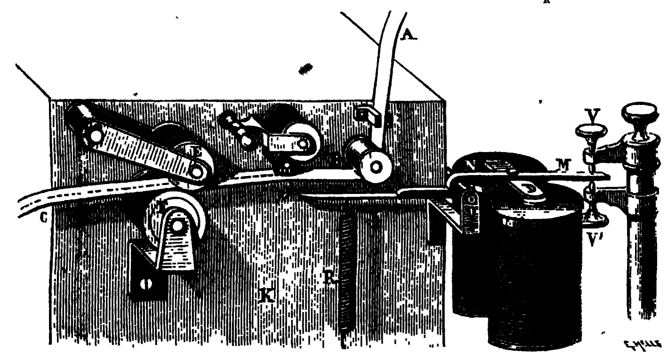


Fig. 926.

de leurs axes, par l'action d'un appareil d'horlogerie contenu dans la boîte K. La pression de la pointe appuie la bande de papier contre une petite roue *m*, ou *molette*, imprégnée d'encre d'imprimerie; il en résulte, sur le papier, des traits d'une longueur variable avec la durée de l'attraction de l'armature. La molette est encrée par un tampon qui repose sur elle. Un guide B, mobile sur son axe, maintient la bande A tendue au-dessous de la molette.

L'électroaimant se désaimante dès que le courant n'y passe plus. Un *ressort antagoniste* R écarte alors la pointe *p* de la bande de papier. Le jeu du levier est limité par deux vis V et V′, contre lesquelles vient buter son prolongement M.

Signes. — Pour former les mots, on emploie deux signes : *le point* qui correspond à un passage extrêmement court du courant et le *trait,* plus long. En combinant les points et les traits, on a formé un *alphabet de convention.* Les mots sont séparés les uns des autres par un intervalle plus grand que les signes d'une lettre.

Communication par un seul fil. — *Un seul fil suffit* pour relier télégraphiquement deux stations. À la station de départ, on joint *à la terre* le pôle négatif de la pile par une plaque de cuivre qui plonge dans l'eau d'un puits. Le pôle positif va au manipulateur. Le fil qui sort du récepteur communique *à la terre* par une plaque de cuivre qui plonge aussi dans l'eau d'un puits. Un fil de ligne *isolé* réunit le manipulateur au récepteur. Cette disposition économise le fil de retour et permet de réduire la puissance des piles à employer, car la terre offre moins de résistance que le fil.

769. Relais télégraphique (fig. 927). — Lorsque la distance entre deux stations est très considérable, le courant arrive trop affaibli pour

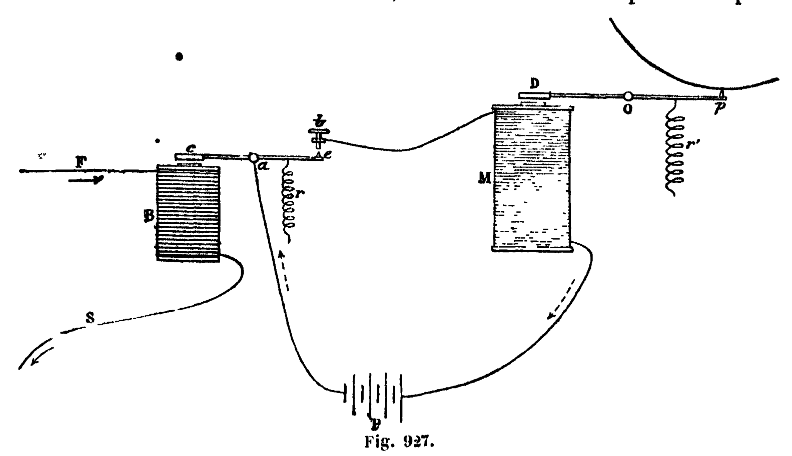


Fig. 927.

faire imprimer les signaux sur la bande à dépêches. On fait alors usage *à la station d'arrivée* d'un électroaimant auxiliaire B, appelé *relais*, qui attire une armature très mobile et fonctionne avec un *courant beaucoup plus faible* que celui qui est nécessaire pour le récepteur Morse. Le relais B est traversé par le courant de la ligne. Au passage de ce courant, l'armature du relais ferme, entre la pointe *e* et la vis *b*, *un circuit spécial* formé du récepteur Morse M et d'une *pile locale* P qui fournit un courant plus intense que le courant de la ligne. Un ressort antagoniste *r* ramène l'armature du relais au repos quand le courant ne passe plus. Les mouvements de va-et-vient de l'armature du relais sont reproduits sur le récepteur Morse par le courant de la pile locale.

770. Installation des postes (fig. 928). — Chacune des stations A et B comprend une pile, un récepteur et un manipulateur.

Quand la station A fait une émission, le manipulateur est au repos en B et abaissé en A, le courant de la pile P passe en *b* au levier ; en *i*, par le fil de ligne *ll'*, il gagne le récepteur de B, passe par *i'* et *d'*; enfin il se rend au sol. Le contact *c'* est attiré et la

pointe p' appuie contre la molette m'. La station B *reçoit un signal.*

Quand la station B fait une émission, le manipulateur est au repos

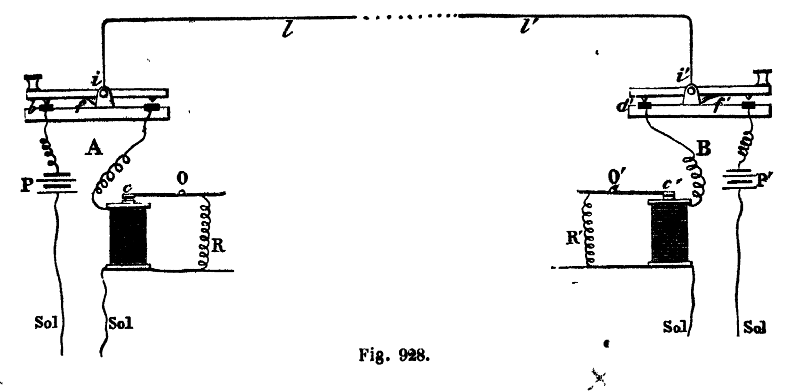


Fig. 928.

en A et abaissé en B, le courant de la pile P′ anime l'électroaimant du récepteur de la station A. La station A *reçoit un signal.*

Le circuit des piles est ouvert lorsque les stations sont au repos.

771. Transmissions rapides. — Au récepteur Morse, une lettre exige plusieurs signaux. A l'appareil Hughes, un signal imprime une lettre.

Télégraphe imprimant de Hughes. — Le télégramme, au poste récepteur, est une bande imprimée en caractères ordinaires.

Au poste récepteur tourne une roue verticale, dite ***roue des types***, sur le pourtour de laquelle sont gravées en relief, à intervalles égaux, les 25 lettres de l'alphabet imprégnées d'encre grasse, séparées de A en Z par un blanc de même largeur qu'une lettre. A l'instant d'une émission du poste transmetteur, un courant instantané envoyé par le fil de ligne anime un électroaimant qui appuie le papier à dépêches sur la lettre (E par exemple) qui se trouve à ce moment à l'extrémité du rayon vertical inférieur de la roue (1). La bande à dépêches tombe immédiatement et avance un peu pour que la nouvelle lettre imprimée soit contiguë à la première. L'espacement des mots est produit à l'aide du blanc.

Le *poste transmetteur* possède une roue semblable à la roue réceptrice. Les blancs des deux roues sont en même temps sur le rayon vertical inférieur et les mouvements des deux roues étant ***synchrônes***, la même lettre E passe à la fois sur les deux roues par le rayon vertical inférieur. En appuyant, au poste transmetteur, sur la touche E d'un clavier, un levier fait sortir une tige métallique ou *goujon;* ce goujon établit un contact (2)

---

(1) Le contact est trop léger pour arrêter le mouvement de la roue.

(2) A l'aide de deux roues d'angle, l'axe de la roue des types imprime une rotation *égale à la sienne* à un axe vertical qui entraîne un bras tournant, appelé *chariot*, au-dessus d'un disque percé de 26 trous rangés circulairement autour de l'axe vertical. Dans une de ces ouvertures se soulève, un peu au-dessus du disque, le goujon qui correspond à la lettre E quand on appuie sur la lettre E du clavier. Le bras tournant passe devant le trou correspondant et établit le contact avec le goujon sorti au moment précis où la lettre E se trouve sur le rayon vertical inférieur de la roue réceptrice.

qui laisse passer dans la ligne un courant à l'instant précis où la lettre E qui correspond au goujon sorti occupe au poste récepteur le rayon vertical inférieur.

Transmetteur multiple. — On augmente le nombre des dépêches transmises à l'aide de transmetteurs multiples qui permettent d'envoyer, en même temps, plusieurs dépêches par le même fil.

Au départ, un *distributeur* met, tour à tour, en communication avec le fil de ligne, pendant des temps très courts, six manipulateurs manœuvrés chacun par un employé; six dépêches se suivent sur la ligne.

A la station d'arrivée, un distributeur répartit entre six récepteurs distincts les dépêches respectives (1).

Câbles souterrains et sous-marins. — Les câbles souterrains sont formés de plusieurs fils de cuivre tordus ensemble et recouverts d'une couche de gutta-percha que protège une enveloppe de plomb.

Les câbles sous-marins (fig. 929) sont formés d'un faisceau de sept fils de cuivre C assemblés en cordelette, recouverts d'une épaisse couche isolante G, et protégés par un revêtement extérieur de fils de fer F. Ceux-ci sont enveloppés chacun d'un ruban de chanvre goudronné et tournés en spirale autour du noyau du câble (2).

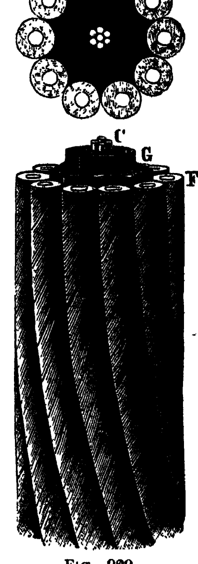


Fig. 929.

INDUCTION

On appelle courant induit un *courant électrique développé sous l'influence de courants électriques ou d'aimants.* Le système magnétique qui donne ainsi naissance, par influence, à un courant est dit *inducteur,* le courant produit par influence est appelé *induit.*

---

(1) A chaque station se trouve un disque divisé en 6 secteurs égaux, indépendants, portant les numéros 1, 2,... 5, 6. Deux secteurs de même numéro d'ordre, 3 par exemple, sont reliés l'un au transmetteur d'un appareil Hughes, l'autre au récepteur du même appareil. Les deux extrémités du fil de ligne aboutissent à deux bras ou rayons de contact qui tournent synchroniquement et passent en même temps sur les deux secteurs numéro 3. La communication est ainsi établie entre les deux stations, par l'appareil Hughes 3, pendant un sixième de tour des deux bras. Prévenu par un téléphone 3 que, commande le bras tournant, l'employé 3 envoie un signal pendant le parcours du secteur qui est relié à son transmetteur.

(2) Dans les lignes sous-marines, la source d'électricité charge d'abord le câble qui constitue un condensateur cylindrique. Cette charge a lieu avant que le récepteur soit actionné. Il en résulte un ralentissement dans la transmission des dépêches.

INDUCTION PAR LES COURANTS

772. Soient deux conducteurs voisins et parallèles (fig. 930). Le premier B est intercalé dans un circuit *inducteur* qui renferme une pile P et un interrupteur *g*, le second B′ appartient à un circuit *induit*, sans pile et comprenant un galvanomètre G.

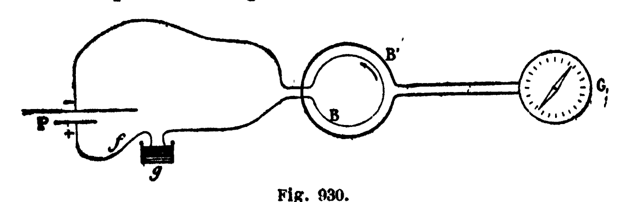


Fig. 930.

I. **Induction par fermeture et par ouverture.** — Prenons pour exemple deux conducteurs circulaires B et B′. Quand on ferme le circuit B, un courant circule dans B′ en sens inverse du courant inducteur. Ce courant **inverse** est un *courant induit de fermeture*. Le galvanomètre, dévié momentanément, revient au zéro et y demeure tant que le courant reste constant en B.

Si l'on interrompt le courant inducteur, un *courant induit de rupture,* très court, **direct**, ou de même sens que le courant inducteur, circule dans le circuit induit B′.

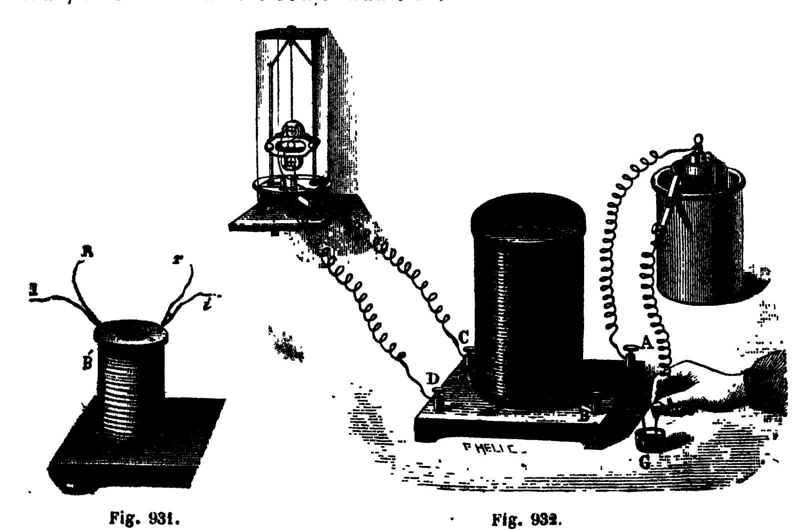


Fig. 931. Fig. 932.

Les phénomènes sont aisés à produire avec des circuits inducteur

et induit formés chacun d'un long fil isolé; les deux fils sont enroulés sur une même bobine (fig. 931). Dans la figure 932, le circuit de la pile communique avec la bobine inductrice par les bornes A et B, le fil induit est relié au galvanomètre par les bornes C et D. L'ouverture et la fermeture se font au godet de mercure G. Les courants induits croissent avec l'intensité du courant inducteur et avec la longueur des fils enroulés.

II. **Induction par accroissement ou diminution d'intensité.** — Si le circuit inducteur comprend une résistance variable à volonté, le circuit induit est parcouru par un courant *inverse* quand on *augmente* l'intensité du courant inducteur, par un courant *direct* quand on *diminue* son intensité.

Le premier groupe d'expériences était un cas particulier du second; en effet, fermer un courant inducteur, c'est faire croître son intensité à partir de zéro; l'ouvrir, c'est réduire son intensité à zéro.

III. **Induction par approche ou éloignement.** — Un courant inducteur étant établi, une bobine induite que l'on éloigne, devient le siège d'un courant induit *direct* qui a la durée du mouvement d'*éloignement*. Le rapprochement des bobines fait naître dans la bobine induite un courant induit *inverse* qui a la durée du mouvement de *rapprochement*. L'expérience se fait, soit avec deux spirales plates, soit avec une bobine *b* qui s'engage dans une autre B de plus grand diamètre (fig. 933). Le galvanomètre se maintient au zéro tant que la distance des deux bobines demeure constante.

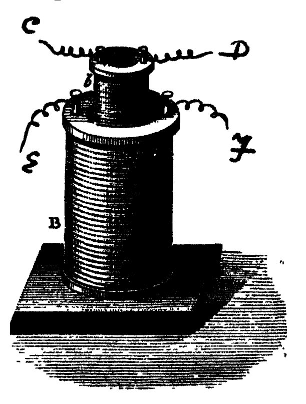


Fig. 933.

En résumé, tout courant qui *commence, augmente d'intensité* ou *s'approche* fait naître, dans un circuit voisin parallèle, un courant induit **inverse** du sien.

Tout courant qui *finit, diminue d'intensité* ou *s'éloigne* fait naître, dans un circuit voisin parallèle, un courant induit **direct**.

INDUCTION PAR LES AIMANTS

773. Puisqu'un aimant se comporte comme un solénoïde, l'in-

duction par les aimants résulte de l'induction par les courants.

I. **Induction par approche ou éloignement.** — Si, dans l'axe d'une bobine creuse reliée à un galvanomètre, on engage *par son pôle sud* un solénoïde inducteur communiquant avec une pile, la bobine est parcourue par un courant induit *inverse* de celui du solénoïde (fig. 934). En introduisant dans la bobine un aimant *par son pôle sud*, on a de même, dans la bobine, un courant *inverse* du courant du solénoïde équivalent à l'aimant. Un courant *direct* prend naissance quand on retire le solénoïde ou l'aimant.

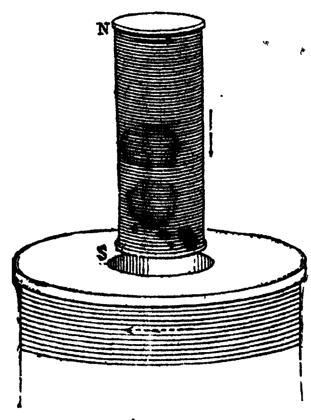


Fig. 934.

II. **Induction par aimantation ou désaimantation.** — Un courant induit prend encore naissance dans une bobine quand on aimante un noyau de fer doux qui occupe son axe ; le courant induit est inverse des courants du noyau. Le noyau peut être aimanté en approchant de son extrémité un des pôles d'un aimant (fig. 935). On a un courant induit direct en éloignant l'aimant.

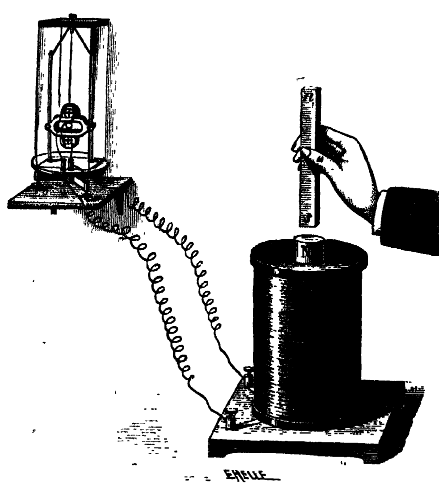


Fig. 935.

On peut encore aimanter le noyau en le logeant dans une bobine à deux fils, dont l'un est parcouru par un courant et joue le rôle d'hélice magnétisante, et dont l'autre sert de fil induit. Les courants du solénoïde équivalent au noyau de fer et ceux de son hélice magnétisante sont de même sens ; ils *ajoutent leurs effets* inducteurs sur la bobine induite. Comparés au courant de l'hélice magnétisante, les courants induits sont ***directs*** à l'ouverture, *inverses* à la fermeture ; *avec le noyau* intérieur les courants induits sont ***beaucoup plus intenses*** qu'avec l'hélice inductrice seule.

III. **Induction par variation d'un aimant.** — Un pôle d'aimant ayant été placé dans l'axe d'une bobine qui est reliée à un galvanomètre, on approche du pôle N un contact de fer doux C, celui-ci s'aimante et *renforce* par réaction les pôles de l'aimant. De là, dans la bobine, un courant induit *inverse* (fig. 936). Si l'on *éloigne* le contact de fer doux, le courant induit est *direct*.

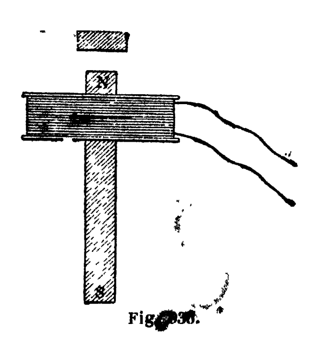


Fig. 936.

INDUCTION D'UN COURANT SUR SON CIRCUIT

774. En variant d'intensité, un courant exerce une induction non seulement sur un circuit voisin, mais aussi sur son propre circuit. Cette induction, nommée **self-induction**, est surtout marquée lorsque le circuit renferme une bobine de fil.

Un courant qui commence fait naître, par induction, dans son propre circuit, un courant **inverse**, appelé courant de *self-induction de fermeture,* qui retarde l'établissement du courant principal.

Si le courant *cesse,* il se produit un courant **direct** de *self-induction d'ouverture*, qui renforce le courant principal.

Démonstration expérimentale. — Pour mettre en évidence les courants de self-induction, l'*équilibre est établi* dans un pont de Wheatstone (fig. 937), avec quatre résistances égales dont l'une S est formée d'un fil enroulé sur une bobine. L'aiguille du galvanomètre G du pont reste au zéro pendant le passage *permanent* du courant de la pile P.

A l'ouverture du circuit en O, un courant direct prend naissance dans la bobine S et parcourt le galvanomètre de D en C. A la fermeture en O, un courant inverse produit une déviation opposée. Des courants induits circulent à toute variation du courant principal.

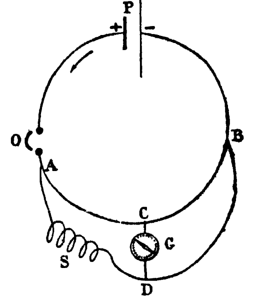


Fig. 937.

775. Effets des courants de self-induction. — Le renforcement de l'étincelle et de la commotion, lors de la rupture d'un circuit qui renferme une bobine, est dû à la self-induction d'ouverture [1].

(1) Les analogies avec les courants liquides se poursuivent dans la self-induction. A partir de l'instant où un courant d'eau est établi dans une conduite, il faut un cer-

Dans un circuit qui ne comprend qu'un long fil tendu entre les pôles d'une pile, l'étincelle de rupture est faible. Si l'on *enroule* ce fil en spirale, l'intensité ne change pas, puisque la résistance n'a pas varié, mais l'étincelle de rupture est renforcée.

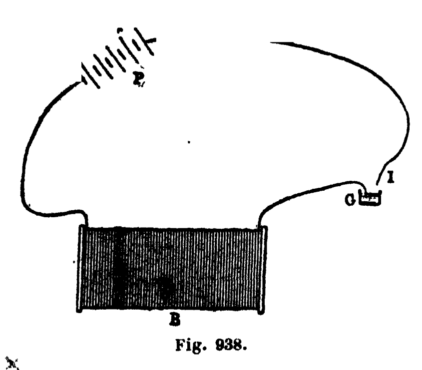


Fig. 938.

Le circuit qui renferme la spirale étant fermé, si l'on prend dans les mains les deux extrémités du fil réunies en I (fig. 938), et qu'on les écarte brusquement, on éprouve une commotion; elle était imperceptible avant l'enroulement du fil.

Le renforcement de l'étincelle et de la commotion à la rupture s'accentue, quand un noyau de fer doux occupe l'axe de la bobine.

La disposition suivante rend apparentes les self-inductions de rupture et de fermeture (fig. 939).

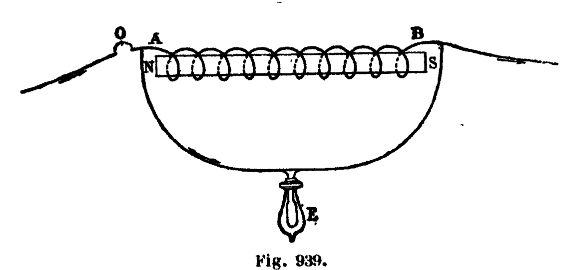


Fig. 939.

Un courant continu se partage en A, entre une lampe à incandescence E et une bobine à noyau de fer NS. Les résistances sont réglées pour que la lampe éclaire faiblement. Si on ouvre le circuit en O, la lampe brille un instant vivement; un courant de self-induction développé dans la bobine a traversé le circuit ABE.

A la fermeture du circuit en O, la lampe s'illumine de même un instant, car le courant de self-induction qui prend naissance dans la bobine ajoute son courant au courant qui parcourt la dérivation. Des commotions sont ressenties, à l'ouverture et à la fermeture, par un opérateur qui se substitue à la lampe (1).

---

tain temps pour que la vitesse d'écoulement prenne sa valeur définitive. Si l'écoulement est brusquement interrompu, le courant ne cesse pas instantanément et la vitesse acquise donne lieu à un *choc violent* (coup de bélier) contre les parois de la conduite.

(1) La fraction qui exprime l'intensité, dans la loi d'Ohm, prend une même valeur par une augmentation du numérateur (force électromotrice) ou par une diminution du dénominateur (résistance). Aussi peut-on interpréter les phénomènes précédents de self-induction soit par une variation de la force électromotrice (force électromotrice d'induc-

Le self-induction d'un circuit constitue une *inertie* que doit vaincre un courant qui commence. En effet, une self-induction augmente le *champ magnétique* créé par un courant. *A la fermeture,* le courant n'atteint que lentement son intensité définitive; en effet, avant de circuler librement, un courant qui s'établit dépense de la force vive pour établir autour de lui un champ magnétique. *A l'ouverture,* le champ magnétique créé disparaît avec le courant et la force vive dépensée à la fermeture est restituée, sous forme de courant, par le milieu qui l'avait emmagasinée; elle produit un travail électrique dans le circuit et renforce le courant qui finit (1).

EFFETS DES COURANTS INDUITS

776. Les courants induits produisent *tous les effets des courants des piles :* effets calorifiques, chimiques, lumineux, magnétiques.

Ils suivent les mêmes lois. Une force électromotrice qui prend naissance dans une spire induite est indépendante des forces électromotrices des autres spires. La force électromotrice totale est la somme des forces électromotrices partielles développées dans les spires successives; de même, la force électromotrice totale d'une pile d'éléments en série est la somme des forces électromotrices partielles des éléments. La loi d'Ohm s'applique aux courants induits.

La relation $a - b = ir$ convient à tout instant, à un conducteur traversé par un courant induit.

Un courant induit crée un *champ magnétique* et produit des effets d'aimantation.

Il dévie l'aiguille ou le cadre d'un galvanomètre. L'*impulsion* permet de mesurer la quantité d'électricité d'un courant de très courte durée; la *déviation fixe* due à des courants qui se succèdent rapidement donne la quantité totale d'électricité qui circule.

Les courants induits donnent naissance à des effets d'induction.

777. Inductions d'ordres successifs. — Soient quatre bobines, B, C, D, E (fig. 940) recouvertes chacune de deux fils parallèles; le deuxième fil de B (fil induit) est relié, par les conducteurs *f* et un interrupteur à pointes, au premier fil de C (fil inducteur); le deuxième fil de C (induit), par les conducteurs *g* et un interrupteur à pointes, au premier fil de D (inducteur); le deuxième fil de D (induit), par les conducteurs *h* et un inter-

---

tion), soit par une variation de résistance. La self-induction de fermeture correspond alors à une augmentation de résistance, passagère et décroissante; la self-induction d'ouverture correspond à une diminution de résistance de la bobine AB.

(1) C'est de la même façon, qu'à la mise en marche d'une machine à vapeur, de la force vive est communiquée au volant avant que la machine prenne sa vitesse de régime. Quand l'arrivée de la vapeur est suspendue, la machine ne s'arrête que lorsque le volant a perdu sa force vive.

rupteur à pointes, au premier fil de E (inducteur); le deuxième fil de E (induit) est fermé sur lui-même par les conducteurs *l* et un dernier interrupteur à pointes I (1).

Un courant de *premier ordre*, produit dans le fil induit de B, par exemple, à la rupture du courant primaire, circule dans le premier fil de C, il

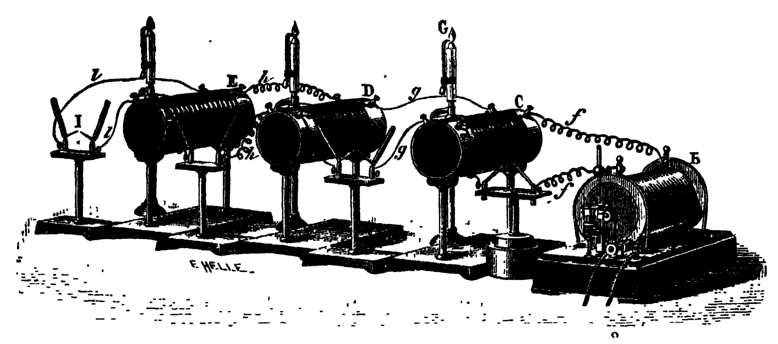


Fig. 940.

engendre dans le second fil de C un courant inverse quand il commence, et un courant direct quand il finit. Ces deux courants sont de *deuxième ordre*. Chacun des courants de deuxième ordre engendre deux courants dans le deuxième fil de D, ce qui fait quatre courants de *troisième ordre*. Il y a huit courants de *quatrième ordre* dans le deuxième fil de E.

LOI DE LENZ

778. Un circuit parcouru par un courant induit exerce des actions électromagnétiques sur le système inducteur; *le sens du courant induit est tel que son action électromagnétique s'oppose à la cause qui produit l'induction* (2). C'est la **loi de Lenz**.

Exemples. — 1° Le courant induit qui est dû au rapprochement d'un circuit inducteur et d'un circuit induit parallèle est *inverse* du courant inducteur; il s'oppose donc au mouvement d'approche.

2° On approche le pôle sud d'un aimant de l'extrémité d'une bobine dont le circuit est fermé : le courant induit dans la bobine, *inverse* des courants de l'aimant, présente une face sud au pôle sud de l'aimant; de là une répulsion qui contrarie le mouvement.

La loi de Lenz permet de prévoir le sens d'un courant induit et renseigne sur l'origine de son énergie.

(1) Outre les interrupteurs I, on voit sur la fig. 940 des interrupteurs à fils verticaux, dont l'étincelle éclate dans un courant de gaz d'éclairage G et l'enflamme.

(2) La loi de Lenz est conforme à la propriété d'un *système élastique de s'opposer aux déformations qu'on lui fait subir.*

779. Source de l'énergie d'un courant induit. — Pour vaincre la résistance qu'un courant induit oppose, par son action électromagnétique, au mouvement du système inducteur, il faut dépenser du travail. Conformément au principe de la conservation de l'énergie, ce travail entretient l'énergie électrique du courant induit. Le travail dépensé pour faire fonctionner les machines magnéto-électriques est un exemple de transformation d'un travail mécanique en énergie électrique, par l'intermédiaire de courants d'induction. L'énergie électrique d'un courant induit est convertie à son tour en énergies variées dans le circuit induit.

780. Courants d'induction dans les masses métalliques. — **Expérience de Foucault** (fig. 941). — Entre les deux

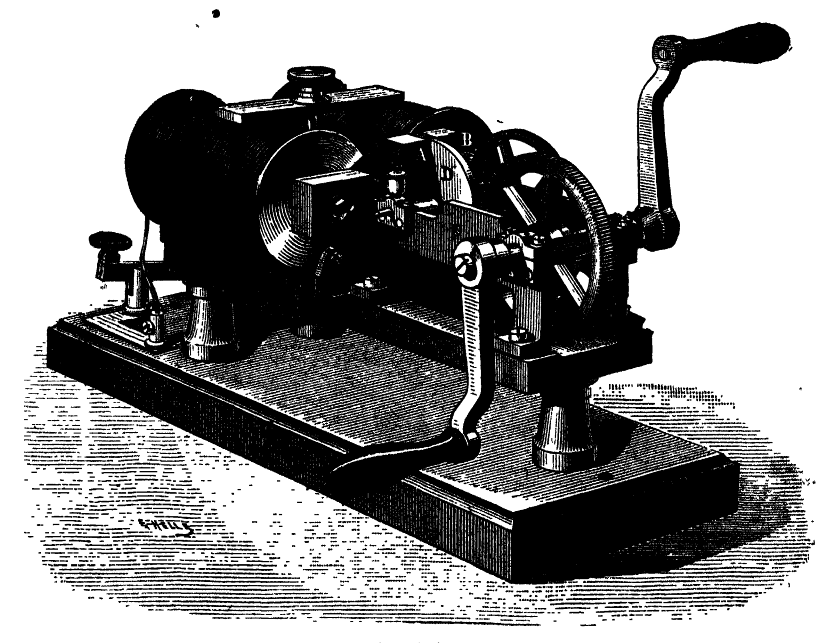


Fig. 941.

pôles très rapprochés A et B d'un puissant électroaimant, on fait tourner un disque métallique plein D. Tant que l'électroaimant n'est pas excité, le disque tourne très aisément. Si l'on fait passer un fort courant dans l'électroaimant, le disque métallique, en mouvement dans le champ magnétique des deux pôles, devient le siège de courants induits qui se ferment sur eux-mêmes [1] dans la masse

(1) Le disque D tourne autour d'un axe dirigé suivant les lignes de force magnétiques, la force magnétique et le déplacement pour un rayon du disque sont rectangulaires

du disque. Par leurs réactions électromagnétiques sur l'électroaimant, les courants induits contrarient le déplacement du disque. Le champ magnétique se comporte par rapport au disque en mouvement comme un milieu résistant et le maintien de la rotation du disque exige alors une grande *dépense de travail* mécanique. Les courants induits échauffent le disque ; l'appareil est un *frein magnétique:* La chaleur produite est équivalente au travail dépensé.

M. Violle a déterminé le travail τ dépensé pour N tours d'une rotation uniforme du disque lorsque l'électroaimant n'agit pas. Lorsque l'électroaimant est excité, il faut pour N tours, dépenser un travail T bien supérieur à τ. La différence $T - \tau$ est transformée intégralement en chaleur par l'intermédiaire des courants induits du disque. Il y a proportionnalité entre la chaleur Q dégagée et les $T - \tau$ joules transformés. $T - \tau = JQ$. J est trouvé égal à l'équivalent mécanique de la calorie, 4,18.

Amortissement des oscillations d'un galvanomètre. — Les oscillations d'un aimant s'éteignent vite au voisinage d'une masse de cuivre. En effet, les courants induits, produits dans le cuivre par le déplacement de l'aimant, exercent une action électromagnétique qui s'oppose au mouvement de l'aimant. C'est ainsi qu'on réduit la durée des oscillations des aiguilles des galvanomètres. Les oscillations du cadre d'un galvanomètre à aimant fixe sont, de même, amorties, à circuit fermé, par les réactions électromagnétiques des courants induits qu'engendre le déplacement relatif du cadre et de l'aimant.

LOIS DE L'INDUCTION

Un aimant et un courant produisent un champ magnétique. Les phénomènes d'induction résultent d'une *variation du champ magnétique* dans la région occupée par le circuit induit. Le *flux de force* qui émane du système inducteur (courant ou aimant) permet de formuler les conditions de production des courants induits, de préciser leur sens et de calculer leur force électromotrice.

781. Conditions de production des courants induits. — *Quand a lieu une variation du flux de force magnétique enveloppé par un circuit fermé, il naît dans ce circuit un courant électrique induit dont la durée est celle de la variation.* Le sens du courant induit change avec le sens de la variation.

---

et situés dans un plan horizontal ; le courant induit est alors dirigé suivant le rayon (784) ; on l'empêche de se fermer en divisant le disque en anneaux de diamètres croissants, séparés par une matière isolante.

La self-induction est comprise dans la loi énoncée, puisque les variations d'intensité d'un courant modifient l'aimantation du feuillet équivalent, et par conséquent le flux de force enveloppé.

Tout déplacement ou toute déformation d'un circuit qui ne modifie pas le flux enveloppé ne donne pas de courant induit. Un circuit n'est donc le siège d'aucun courant induit s'il est transporté *parallèlement à lui-même* de M en M_1 dans un champ magnétique uniforme, où les lignes de force sont équidistantes et parallèles (fig. 942). Dans un champ magnétique variable, un transport parallèle, de M en M' où le flux est différent, détermine un courant induit.

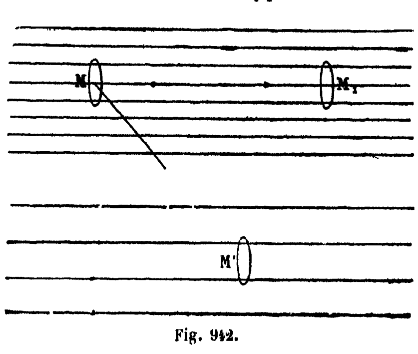


Fig. 942.

Sens des courants induits. — D'après la loi de Lenz, un courant induit s'oppose au phénomène inducteur qui lui donne naissance : *le flux magnétique d'un courant induit contrarie donc la variation du flux magnétique inducteur.* Il renforce, d'après cela, un flux inducteur décroissant, il réduit un flux inducteur croissant.

Du sens du flux induit on déduit le *sens du courant induit.*

Exemples. — 1° Approchons d'un pôle nord N une spire conductrice fermée (fig. 943) ; en passant de MM' en $M_1M'_1$, la spire intercepte un *flux* divergent *croissant.* Le flux du courant induit qui la parcourt, contraire au flux inducteur croissant, a la direction des flèches *f*; la face nord du courant induit regarde le pôle nord de l'aimant.

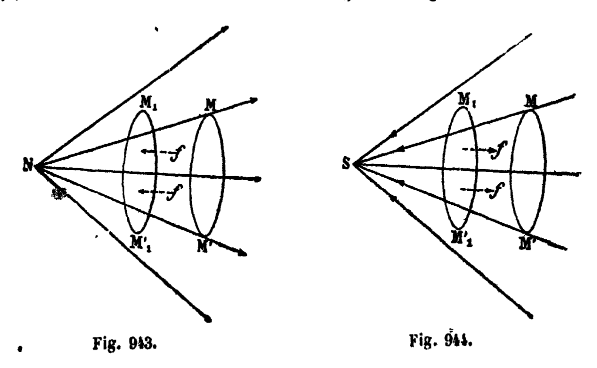


Fig. 943. Fig. 944.

2° Un circuit MM', approché d'un pôle sud S (fig. 944), intercepte

un flux convergent croissant ; la direction des flèches montre que la face sud du courant induit qui prend naissance regarde le pôle S.

3° Ouvrons brusquement un circuit traversé par un courant; son flux disparaît, il se produit dans le circuit même un courant de self-induction de rupture qui *renforce le flux décroissant.*

4° A la fermeture d'un courant, le circuit même est parcouru par un courant de self-induction inverse qui *diminue le flux croissant.*

782. Induction par la Terre. — A Paris, les lignes de force du champ magnétique font un angle d'environ 64° avec l'horizontale.

Le champ magnétique terrestre étant uniforme, il ne se produit pas de courant induit dans un cadre transporté parallèlement à lui-même.

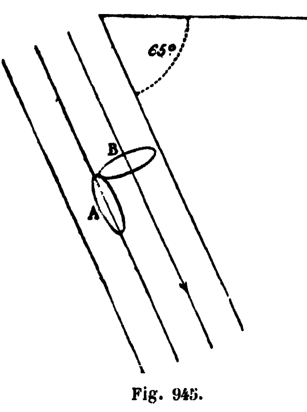


Fig. 945.

Mais il se produit un courant maximum si l'on fait passer le cadre d'une position A parallèle aux lignes de force, à une position B perpendiculaire. Le flux induit a une direction *opposée à celle du flux terrestre enveloppé qui est croissant,* et le cadre tourne vers le sol sa face négative. Au retour de B en A, un nouveau courant induit parcourt le cadre, inverse du précédent; tournant vers le sol sa face positive (fig. 945).

783. Force électromotrice induite. — ***La force électromotrice d'induction créée dans un circuit fermé est, à chaque instant, proportionnelle à la variation, par seconde, du flux de force qui le traverse*** (ou à la dérivée du flux par rapport au temps).

A un instant donné, la force électromotrice d'induction est

$$e = \text{Lim.} \frac{\Delta\Phi}{\theta}.$$

Si θ est la durée de la variation $\Delta\Phi$ du flux de force enveloppé par un circuit induit, la force électromotrice moyenne d'induction, exprimée en volts, est le quotient de $\Delta\Phi$ par le produit $\theta.10^8$.

La force électromotrice croît quand le numérateur $\Delta\Phi$ augmente et quand le dénominateur θ diminue. Pour augmenter $\Delta\Phi$, on augmente soit l'intensité du champ magnétique, soit le nombre des spires induites (dans le cas d'une bobine) ; on diminue θ en augmentant la rapidité de la variation du flux.

L'intensité moyenne d'un courant induit, dans un circuit de ré-

sistance R, pendant un temps θ, est exprimée en ampères par

$$I = \frac{\Delta\Phi}{R.\theta.10^8}.$$

R est évalué en ohms, Φ en unités magnétiques. La quantité d'électricité mise en mouvement pendant ce temps est $m = I\theta$.

La **quantité totale d'électricité** du courant induit sera :

$$m + m' + m'' + \ldots = I\theta + I'\theta' \ldots = \frac{\frac{1}{10^8}\Sigma\Delta\Phi}{R} = \frac{\frac{1}{10^8}(\Phi_1 - \Phi_2)}{R}.$$

La *quantité totale d'électricité induite est le quotient par la résistance du* circuit de *la différence des flux de force* enveloppés par le circuit au commencement et à la fin du courant.

Pour le calcul de $\Delta\Phi$, il importe de faire remarquer que le flux de force qu'enveloppe un circuit comprend deux parties : 1° Le flux qui est dû aux masses magnétiques extérieures (aimants ou courants) ; 2° le flux de force dû au courant qui traverse le circuit lui-même.

784. Résumé des phénomènes d'induction. — I. *Phénomènes généraux.* — 1° La quantité totale d'électricité d'un courant induit *ne dépend que de la variation du flux de force intercepté;* elle ne dépend ni de la durée de la variation, ni de la loi de cette variation. Ainsi, la quantité d'électricité engendrée dans un circuit par son déplacement dans un champ magnétique *ne dépend que des positions extrêmes du circuit;* elle est indépendante du trajet parcouru et de la vitesse du déplacement.

2° La nature du conducteur n'influe que par la résistance qu'il introduit dans le circuit.

3° Un courant induit est indépendant du courant qui peut déjà traverser le circuit ; il s'ajoute à ce courant ou s'en retranche.

4° Des variations *égales et contraires* du flux de force produisent une même quantité absolue d'électricité, mais les courants induits sont de sens contraires; car, dans l'ensemble des deux transformations, la variation totale du flux est nulle et, par conséquent, la quantité totale d'électricité mise en circulation est nulle.

5° La force électromotrice du courant induit est la plus grande au moment où la *variation du flux* de force enveloppé *est la plus rapide.* Un maximum et un minimum d'une fonction correspondant à une variation nulle de cette fonction, une force électromotrice d'induction est nulle quand le flux de force passe par un maximum ou un minimum.

6° Dans la *décharge oscillatoire* d'un condensateur, les variations d'intensité sont extraordinairement rapides (**820**) pour cette raison, les forces électromotrices des courants induits développés par ces décharges sont extrêmement élevées.

II. *Induction entre deux circuits ou induction mutuelle.* — 1° Les flux de force enveloppés par un circuit induit à l'ouverture et à la fermeture d'un même courant inducteur étant égaux et de signes contraires, les courants induits correspondants, direct et inverse, mettent en circulation des quantités d'électricité égales et contraires.

2° L'ouverture d'un courant inducteur produit la même quantité d'électricité induite que son éloignement à l'infini, car le circuit induit cesse dans les deux cas d'être traversé par le flux de force du courant inducteur. La fermeture d'un courant inducteur équivaut à son rapprochement de l'infini à sa position actuelle.

3° Le flux de force d'un courant inducteur étant proportionnel à son intensité, les quantités d'électricité induites à l'ouverture et à la fermeture sont proportionnelles à cette intensité.

4° Une diminution Δi de l'intensité d'un courant inducteur agit comme l'éloignement à l'infini d'un circuit identique au circuit inducteur traversé par un courant Δi. Une augmentation Δi de l'intensité, équivaut à une superposition au circuit inducteur d'un circuit identique venu de l'infini et traversé par un courant Δi.

5° Comme l'ouverture et la fermeture d'un circuit ont lieu dans un temps beaucoup plus court que son éloignement ou son rapprochement, les intensités moyennes du courant d'ouverture et du courant de fermeture sont supérieures aux intensités moyennes des courants obtenus par approche ou éloignement.

III. *Self-induction.* — Quand une spire est traversée par un courant, ce courant détermine un flux de force dirigé intérieurement de la face sud à la face nord de la spire; si l'on ouvre le circuit, ce flux disparaît; la disparition du flux donne naissance à un courant de self-induction direct. La variation du flux est plus grande si le circuit comprend plusieurs spires, car le circuit embrasse la somme des flux dus à toutes les spires. La variation est considérablement accrue s'il y a un noyau de fer dans l'axe de la bobine (**764**). Si la variation du flux est très rapide, la force électromotrice induite devient aussi très élevée.

A la fermeture du circuit, la variation du flux étant la même qu'a l'ouverture, les quantités d'électricité mises en mouvement par les deux courants de self-induction sont égales. La force électromotrice

induite est moindre à la fermeture qu'à l'ouverture, car, à la fermeture, la variation du flux est plus lente.

Une force électromotrice de self-induction est, à chaque instant, proportionnelle à la variation par seconde du flux de force dû au courant qui est enveloppé par son circuit ou à la variation, par seconde, de l'intensité (car le flux de force est proportionnel à l'intensité); elle a pour expression $L\frac{di}{dt}$; le coefficient L de self-induction dépend de la forme du circuit (1).

Force électromotrice élémentaire. — Au lieu d'évaluer la force électromotrice totale développée dans un circuit fermé, on peut considérer les forces électromotrices partielles qui se rapportent aux diverses parties d'un circuit induit. Pour un fil rectiligne, le *maximum de force électromotrice* est fourni par un fil normal aux lignes de force magnétiques, se déplaçant à la fois normalement à sa direction et à la direction des lignes de force.

Ce maximum de la force électromotrice correspond à la position du fil pour laquelle la force électromagnétique est maximum quand il est parcouru par un courant. Le travail est alors maximum pour le déplacement du fil suivant la force électromagnétique.

Si le nageur d'Ampère suit *le déplacement* OC de l'élément et regarde dans le sens de la force magnétique, c'est sur *sa gauche* que se dirige le courant induit qui prend naissance sur l'élément OA (à gauche du déplacement); la force électromagnétique exercée sur le courant induit est ainsi, conformément à la loi de Lenz, de sens contraire au déplacement de l'élément (fig. 946). La somme algébrique des flux coupés par les différents éléments d'un circuit est la variation du flux total que le circuit enveloppe.

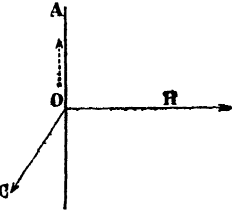
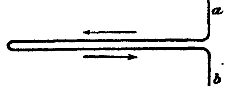


Fig. 946.

S'il s'agit d'un *circuit ouvert,* dont certaines parties coupent les lignes de force d'un champ magnétique, il se développe dans chaque élément de circuit une force électromotrice proportionnelle à la variation par seconde du flux coupé par l'élément. La somme algébrique des forces électro-

(1) Le coefficient L est très faible pour un conducteur rectiligne; la forme de solénoïde est celle qui donne la plus forte valeur à L et ce coefficient augmente beaucoup si le solénoïde entoure un noyau de fer. Pour un conducteur *a b* replié parallèlement à lui-même, le flux de l'une des branches est contraire au flux de l'autre et L est nul. On annule dans une bobine les effets de self-induction en enroulant le fil en double.





motrices établit entre les extrémités du circuit une *différence de potentiel* qui produit un courant lorsque le circuit est fermé.

BOBINE D'INDUCTION

785. La bobine d'induction, ou bobine de Ruhmkorff, est *une source de courants induits de haut potentiel,* dus aux variations rapides du champ magnétique d'un électroaimant.

Description. — La bobine d'induction ne diffère d'un appareil de démonstration des courants induits (fig. 933) que par les dimensions relatives des deux fils. Le *fil inducteur* est un fil gros et court, enroulé sur une bobine cylindrique de faible diamètre.

Autour de la bobine inductrice et séparées d'elle par un tube d'ébonite, sont enroulées de nombreuses spires d'un fil métallique fin, recouvert de soie et verni. Ce fil est le *fil induit,* son diamètre ne dépasse pas $0^{mm},25$, sa longueur peut être considérable.

La bobine inductrice est traversée, suivant son axe, par un *noyau de fer doux,* qui a pour effet d'augmenter considérablement le flux de force (**764**) enveloppé par les spires de la bobine induite.

Fonctionnement. — Toute fermeture du circuit inducteur ou *primaire* fait naître dans le circuit induit ou *secondaire* un courant inverse; toute ouverture y développe un courant direct (**772**). Des fermetures et ouvertures successives produisent dans le circuit induit une succession de courants qui sont chacun très courts.

La force électromotrice induite croît avec la vitesse de variation du flux de force enveloppé par chaque spire.

Les forces électromotrices des différentes spires du circuit secondaire sont de même sens et s'ajoutent; les spires se comportent comme des éléments de pile associés en série. La force électromotrice totale est ainsi *proportionnelle au nombre des spires.*

Propriétés des courants induits d'ouverture et de fermeture. — Si les deux extrémités du fil induit sont réunies, et si une ouverture du circuit inducteur suit une fermeture, le circuit induit est traversé alternativement par *deux courants de sens contraires dont les quantités d'électricité sont égales.* Les deux courants sont en effet dus à l'apparition et à la disparition d'un *même* flux de force.

Deux courants, direct et inverse, consécutifs, produisent une égale déviation d'un galvanomètre, mais *la différence de potentiel maxi-*

mum est beaucoup plus grande pour le courant direct ou d'ouverture. En effet, la self-induction de fermeture (**774**) retarde l'établissement du courant inducteur, ce qui prolonge la durée du courant induit de fermeture; le courant induit de rupture est plus bref et, d'autre part, il *est renforcé par un courant direct du self-induction.* Par leur haute différence de potentiel, les courants induits **directs** traversent un *intervalle d'air* ménagé sur le parcours du fil induit. On n'a d'étincelle induite qu'à l'ouverture du courant inducteur.

Pôles positif et négatif d'une bobine d'induction. — Les courants inverses étant arrêtés *par un intervalle d'air,* le courant interrompu qui se propage suivant les étincelles a, *sans appareil redresseur,* une direction constante. On parle ainsi des pôles *positif* et *négatif* d'une bobine d'induction comme des pôles d'une machine électrique.

786. Description des divers organes. — Interrupteur. — L'interrupteur des petites bobines fonctionne automatiquement.

Interrupteur à trembleur (fig. 947). — Le courant inducteur arrive par le support AB, passe dans une lame élastique qui porte un contact en fer doux *c*, il gagne la vis V par la pointe *i* qui touche la lame élastique et se rend dans le fil inducteur; le noyau s'aimante, attire le contact, et produit une interruption en *i*. L'élasticité du ressort ramène la lame contre la pointe, et ferme de nouveau le circuit.

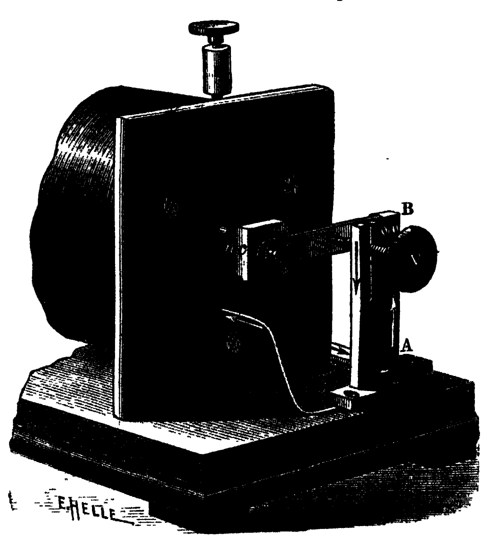


Fig. 947.

Interrupteur de Foucault (fig. 948). — Foucault a obtenu une interruption *très brève* avec une pointe de platine qui sort d'un godet à mercure.

Le marteau *c* forme l'une des extrémités d'un levier porté par un ressort vertical *a*, l'autre extrémité *l* se termine par une pointe en platine *p* qui plonge dans un godet à mercure. Le courant inducteur arrive par une borne A, parcourt la spirale inductrice, monte ensuite le long du ressort *a*, passe à la pointe *p* par la branche *l* du levier; du godet à mercure il gagne la borne B. Le circuit étant fermé, le noyau attire le marteau *c*, ce qui soulève l'extrémité opposée *l* du levier et fait sortir la

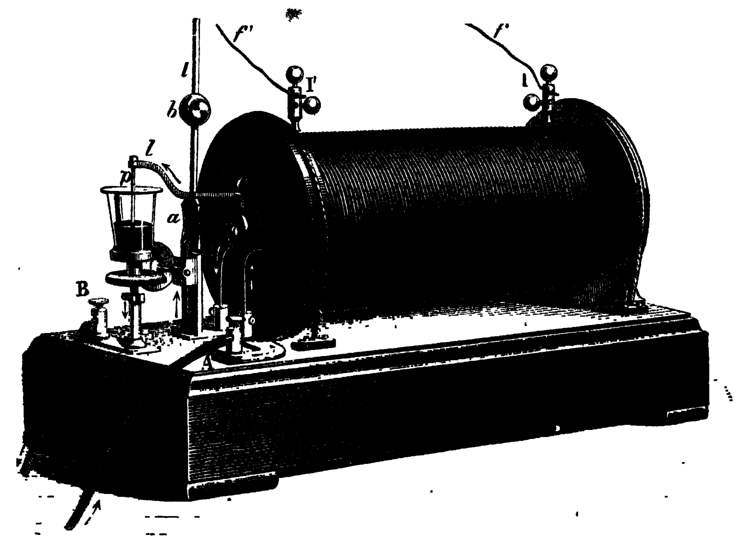


Fig. 948.

pointe du godet. Le courant étant interrompu, le ressort ramène la pointe dans le mercure, ce qui ferme de nouveau le circuit. On réduit la durée de l'étincelle de rupture entre le platine et le mercure en recouvrant le mercure d'une couche liquide isolante; la *rapidité* de l'interruption augmente la *force électromotrice maximum* du courant induit.

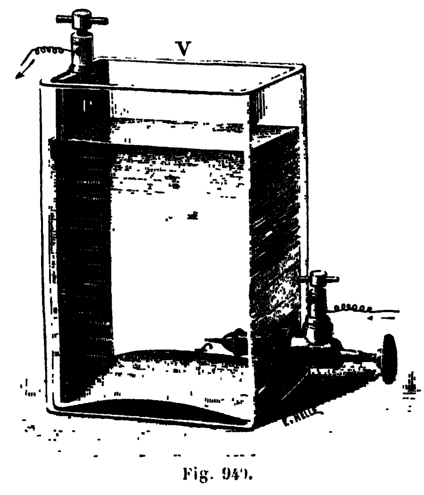


Fig. 949.

Interrupteur électrolytique (fig. 949). — L'interrupteur de Wehnelt est un voltamètre à acide sulfurique dilué et à électrodes très inégales. L'électrode positive est un fil fin de platine *f*, l'électrode négative est une large plaque de plomb P. Ce voltamètre se comporte avec des courants faibles comme un voltamètre ordinaire. Quand l'intensité du courant augmente suffisamment, le dégagement d'oxygène devient *intermittent* (1). La rapidité des interruptions croît avec l'intensité. Leur nombre peut atteindre 2000 par sec. (2).

---

(1) **Le fil de platine, fortement échauffé par le courant, s'entoure d'une gaine isolante de vapeur, qui interrompt le courant; au moment de l'interruption, la gaine gazeuse se condense, diminue, et le courant se rétablit. Les variations sont très rapides.**

(2) **Avec l'interrupteur électrolytique, le condensateur est superflu. Cet interrupteur exige une haute tension du courant primaire (60 volts au moins).**

Condensateur. — A la rupture du circuit inducteur, un courant de self-induction de même direction que le courant qui finit, *prolonge sa durée.* Le ralentissement de la variation du flux de force enveloppé par les spires induites entraîne alors une diminution de la force électromotrice induite.

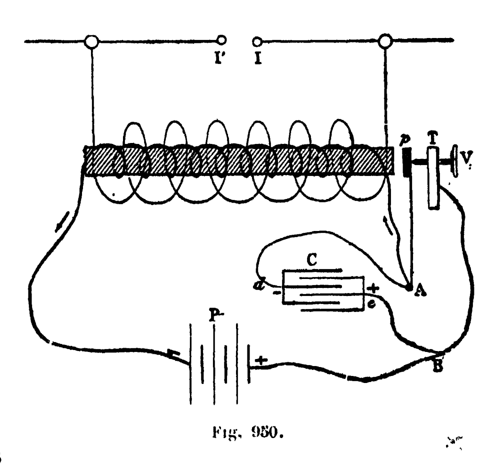


Fig. 950.

Entre deux points A et B, du circuit inducteur, *de part et d'autre de l'interruption du courant,* on intercale en dérivation un condensateur C (fig. 950). Les feuilles conductrices impaires du condensateur réunies en *d,* aboutissent en A; les feuilles paires, réunies en *e*, aboutissent en B.

Rôle du condensateur. — A la rupture du courant inducteur, le condensateur se charge. Sa grande capacité diminue la différence de potentiel à l'interruption, entre le contact *p* et la pointe de la vis V et l'*étincelle de self-induction diminue.* Le courant de la décharge du condensateur suit, d'autre part, la bobine inductrice en *sens inverse* du courant inducteur, ce qui contribue à désaimanter plus vite le noyau de fer.

En outre, par l'introduction d'un condensateur dans le circuit primaire, l'étincelle qui jaillit à l'interruption entre A et B est une étincelle de *haute fréquence* (**821**). Les courants alternatifs qui l'accompagnent et qui parcourent le circuit primaire, développent dans le fil secondaire des courants induits de force électromotrice très élevée (**784**, I, 6°).

Avec une bobine à condensateur mobile, on reconnaît que les étincelles obtenues à la coupure II' de l'excitateur *augmentent beaucoup de longueur* par l'adjonction du condensateur.

Division du noyau de fer doux. — Un noyau métallique massif serait parcouru par des courants induits parallèles au courant interrompu dont le flux contrarierait le flux inducteur (**781**). On rend l'intensité de ces courants négligeable en sectionnant la masse de fer normalement à la direction des courants. A cet effet, on forme le noyau de fils de fer, parallèles à l'axe de la bobine et isolés les uns des autres.

Cloisonnement de la bobine induite. — Dans les fortes bobines, on n'enroule pas le fil induit en couches superposées, passant cha-

cune d'une extrémité à l'autre de la bobine et revenant au point de départ. En effet, les potentiels s'échelonnent tout le long du circuit induit et deux spires superposées, séparées par une grande longueur de fil, offriraient une forte différence de potentiel, capable de produire entre les deux spires une étincelle, qui romprait la gaîne isolante et inutiliserait la couche comprise entre deux points ainsi réunis.

On compose la bobine induite de spirales plates ou galettes, perpendiculaires à l'axe de la bobine, associées en série et séparées les unes des autres par des isolants (fig. 951). De cette façon, la différence du potentiel entre deux fils superposés reste petite, comme la longueur de fil qui les sépare.

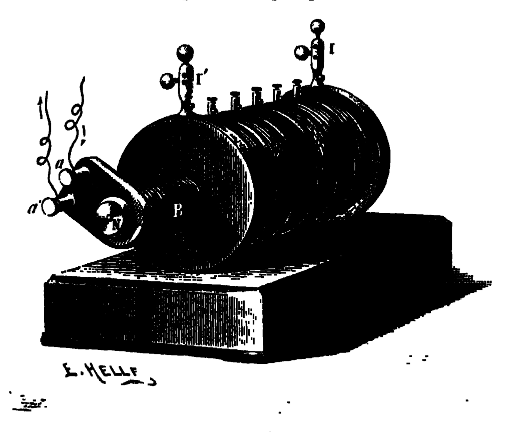


Fig. 951.

787. Usages de la bobine d'induction. — Le circuit induit comprend d'ordinaire une interruption; il donne alors un flux d'étincelles dues au seul courant direct. La résistance gazeuse de l'interruption étant incomparablement supérieure à la grande résistance du fil induit, la différence de potentiel aux pôles reste à peu près aussi forte que si le circuit était complètement ouvert.

Comparé au courant d'une pile, le courant des étincelles n'a qu'un faible débit, il ne produit que de minimes actions chimiques et magnétiques, mais il offre des différences de potentiel très élevées.

Avec mille éléments de pile associés en série on n'obtient en rapprochant les pôles que des étincelles extrêmement courtes. Entre les extrémités du fil induit d'une grande bobine d'induction, les étincelles ont pu, dans l'air, dépasser un mètre.

Les deux extrémités du circuit induit étant terminées, l'une par une pointe, l'autre par un disque, la distance explosive, pour une même différence de potentiel, est plus grande quand la pointe est *positive*. Les étincelles vont, dans ce cas, au *centre du disque*. Les étincelles partent des bords si la pointe est négative.

Les effets de la bobine d'induction sont ceux des machines élec-

trostatiques, mais renforcés, car le débit est plus considérable.

La bobine d'induction sert dans l'analyse spectroscopique; elle est utilisée par enflammer des mines à distance, charger des bouteilles de Leyde, illuminer les gaz raréfiés, exercer des actions physiologiques et thérapeutiques.

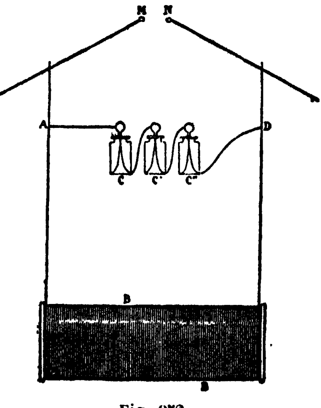


Fig. 952.

Charge d'un condensateur. — Pour charger un condensateur qui doit donner une étincelle à chaque rupture du circuit primaire, le condensateur à charger est placé en dérivation (fig. 952); ses armatures sont reliées directement aux bornes du secondaire en AD. La longueur de l'étincelle en MN est d'autant plus petite que la capacité du condensateur est plus grande.

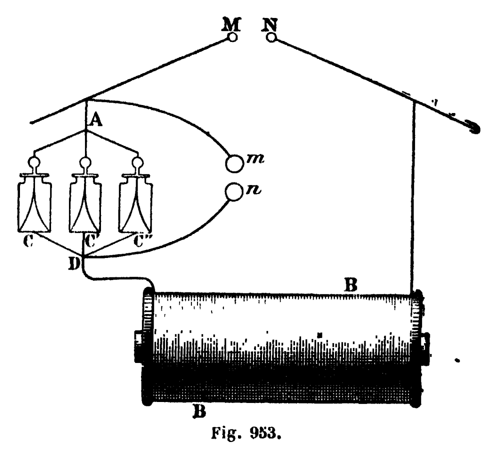


Fig. 953.

Pour charger une *batterie* de très grande capacité, et obtenir une étincelle de décharge qui ne soit pas trop courte, on ménage dans le circuit secondaire une interruption entre M et N (fig. 953); le *courant induit direct passe seul.* A chaque étincelle qui éclate en MN, la batterie reçoit une même quantité d'électricité Après un certain nombre d'étincelles en MN, la batterie se décharge en *mn* par une étincelle bruyante. L'intervalle *mn* étant plus petit que MN, la batterie ne se décharge pas dans la bobine.

TÉLÉPHONES

788. Un téléphone est un appareil électromagnétique capable de *transmettre la parole à distance* entre deux stations S et S'. On

parle en S devant un transmetteur et on écoute en S′ au récepteur.

Téléphone magnétique. — Dans le téléphone magnétique, le transmetteur et le récepteur sont identiques; ils peuvent se substituer l'un à l'autre. Le téléphone de Graham Bell (fig. 954) consiste en un *barreau aimanté* droit A, entouré à l'une de ses extrémités polaires par une *bobine* B de fil fin recouvert de soie ou émaillé. A une très petite distance de ce pôle, une *mince plaque* circulaire de tôle M est fixée par ses bords dans une gaine en bois qui enveloppe l'appareil. Les fils *f* de la bobine du transmetteur vont, des bornes *a*, *par un double fil*, à la bobine du récepteur. La bobine du transmetteur, le double fil et la bobine du récepteur forment un seul circuit qui ne contient pas d'élément de pile.

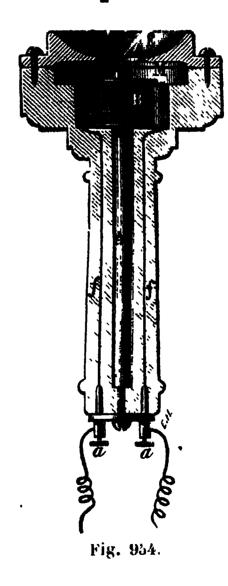


Fig. 954.

Si l'on parle, à une station S, dans le cornet E qui surmonte la plaque du transmetteur, les vibrations de l'air agissent sur la plaque M, la rapprochent et l'éloignent alternativement de l'aimant sans qu'il y ait contact [1]; de là *des modifications de l'aimantation de l'aimant* et des variations du flux de force qui traverse la bobine (**773**). Des courants induits intermittents suivent les fils de ligne et arrivent à la bobine du téléphone de la station S′ (fig. 955). Ces courants font *varier le magnétisme* de l'aimant du récepteur et déterminent dans la plaque des vibrations identiques à celles de la plaque du transmetteur [2]. En approchant l'oreille du cornet du récepteur, on entend les sons émis devant le cornet du transmetteur.

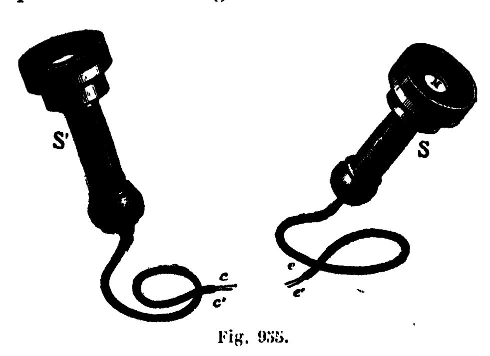


Fig. 955.

Les courants induits du téléphone transmetteur sont extrêmement

---

(1) Par une vis de réglage on éloigne ou on rapproche l'aimant de la plaque vibrante.

(2) Le nombre de vibrations étant le même dans le transmetteur et dans le récepteur, la *hauteur* du son n'est pas modifiée. *L'amplitude* est moindre au récepteur qu'au transmetteur. Le *timbre* est altéré par des harmoniques propres à la rondelle vibrante.

faibles et le son entendu au récepteur est très peu intense (1).

Téléphone à pile. — Le téléphone à pile donne des sons plus intenses que le téléphone magnétique et accroît la portée de la transmission. Dans le téléphone à pile, *le transmetteur est un microphone,* le récepteur est un téléphone.

Un **microphone** très simple consiste en un crayon de charbon CD taillé en pointe à ses deux extrémités et maintenu entre deux cavités creusées dans des supports de charbon A et B qui lui laissent une certaine mobilité (fig. 956). Le crayon et ses supports font partie d'un circuit comprenant une pile P et le téléphone récepteur T. Les supports A et B sont fixés à une mince plan-

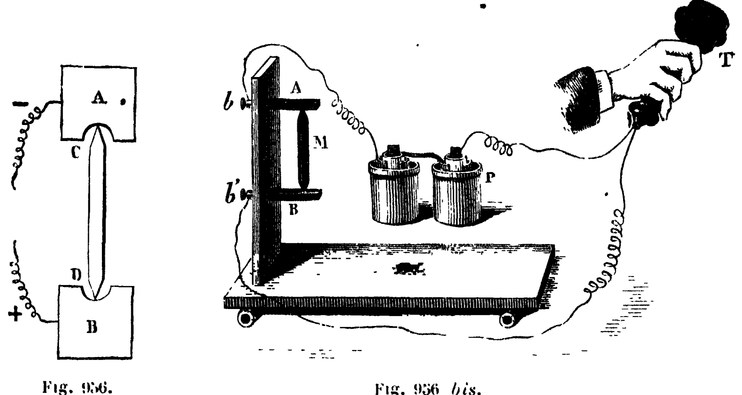


Fig. 956. Fig. 956 *bis*.

chette *devant laquelle on parle. La parole* détermine de *légers déplacements* des points de contact du crayon avec ses supports (fig. 956 *bis*). Les variations de résistance qui en résultent font varier l'intensité du courant de la pile et modifient le magnétisme (2) de l'aimant du récepteur; les vibrations de la plaque du téléphone T reproduisent les sons émis. On perçoit la marche d'un insecte sur une planchette, solidaire du microphone.

Le *transmetteur Ader* forme une boîte dont le couvercle, en sapin mince, recouvre le microphone. Le microphone consiste en crayons de charbon, disposés *parallèlement* pour offrir moins de résistance

(1) Un seul fil de ligne ne suffit pas comme en télégraphie électrique. En effet, le courant d'un circuit voisin pourrait influencer par induction le circuit téléphonique. On enroule, l'un autour de l'autre, les deux fils qui relient le parleur au récepteur; de cette façon un courant voisin produira dans les deux fils des courants de sens contraire qui s'annuleront.

(2) Un téléphone intercalé dans le circuit d'une pile à courant constant ne laisse entendre aucun son.

au courant de la pile; ils reposent librement par leurs extrémités, sans serrage, dans des cavités creusées à l'intérieur de prismes de charbon A, B, C (fig. 957). Émise au-dessus de la boîte, la parole met en vibration le couvercle ainsi que les contacts des charbons du microphone et fait varier la résistance du circuit.

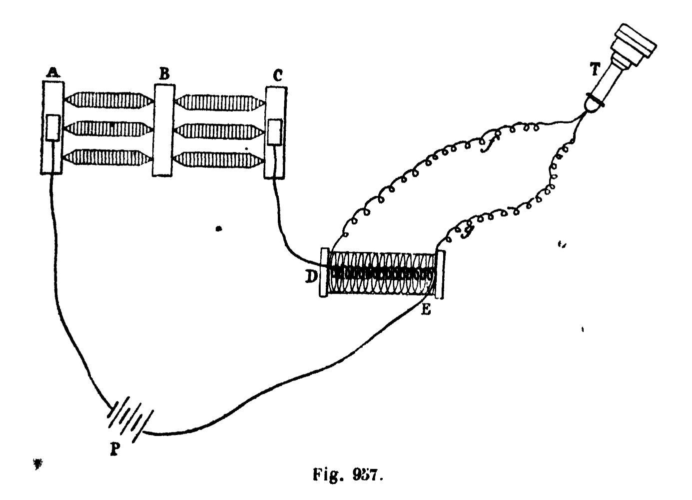


Fig. 957.

Emploi d'un transformateur. — Si la ligne est longue, et par conséquent très résistante, les faibles variations de résistance du microphone ne modifient pas assez l'intensité pour agir efficacement sur le récepteur. On emploie alors avec avantage un transformateur (**803**). Le fil gros et court de la bobine du transformateur, le microphone transmetteur ABC et la pile P forment un circuit *primaire* peu résistant; le fil fin de la bobine, les fils de ligne *fg* et le téléphone récepteur T forment le circuit *secondaire* (fig. 957). Les variations d'intensité provoquées dans le fil inducteur par les vibrations du microphone devant lequel on parle développent dans le fil fin des courants induits de grande force électromotrice qui agissent vivement sur le récepteur.

MACHINES D'INDUCTION

789. Les générateurs de courants fondés sur l'induction comprennent : 1° un **inducteur,** établissant un champ magnétique; 2° un **induit,** interceptant un flux de force variable; l'induit est le siège d'une force électromotrice. Un **collecteur** recueille les courants induits.

Les réactions électromagnétiques des courants induits sur le

système inducteur déterminent des résistances au déplacement (*loi de Lenz*), qui nécessitent une dépense de travail (**779**). Ce travail est équivalent à l'énergie électrique induite qu'il entretient.

Si l'inducteur est un aimant permanent, la machine d'induction est *magnétoélectrique;* elle est *dynamoélectrique* si l'inducteur est un électroaimant.

Les machines d'induction remplacent les piles dans la plupart des applications industrielles. Elles fournissent des *courants alternatifs*, c'est-à-dire des courants dont le sens change à des intervalles de temps égaux, très rapprochés. Elles donnent des *courants continus,* qui conservent un même sens, par l'emploi de collecteurs particuliers (machine de Gramme).

MACHINE DE GRAMME

790. Description. — **Circuit induit mobile ou anneau de Gramme.** — Sur un *anneau* ou cylindre creux de fer doux est enroulé un fil conducteur, isolé, subdivisé en bobines plates P_1 P_2 P_3..., ayant toutes un même nombre de spires et réunies par leurs extrémités de manière à former un *circuit unique*. Les plans des spires se coupent sur l'axe A de l'anneau.

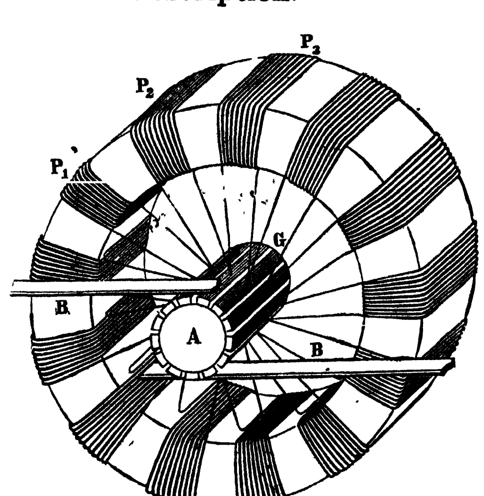


Fig. 958.

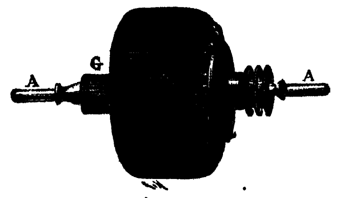


Fig. 959.

Le fil f_2 qui termine P_2 se continue par le fil c_3 qui commence P_3; le point de jonction est soudé à une *barre de cuivre*, parallèle à l'axe de rotation et encastrée sur son pourtour. Ces barres, isolées les unes des autres, forment les génératrices d'un cylindre, solidaire de l'anneau, qui constitue le **collecteur** G (fig. 958 et 959).

Deux frotteurs B, ou **balais** conducteurs, appuient constamment

sur le collecteur et sont respectivement en contact avec deux ou trois de ses génératrices correspondant aux extrémités d'un diamètre de l'anneau. Chacun des balais est relié à une borne à laquelle s'attache un des fils d'un circuit extérieur.

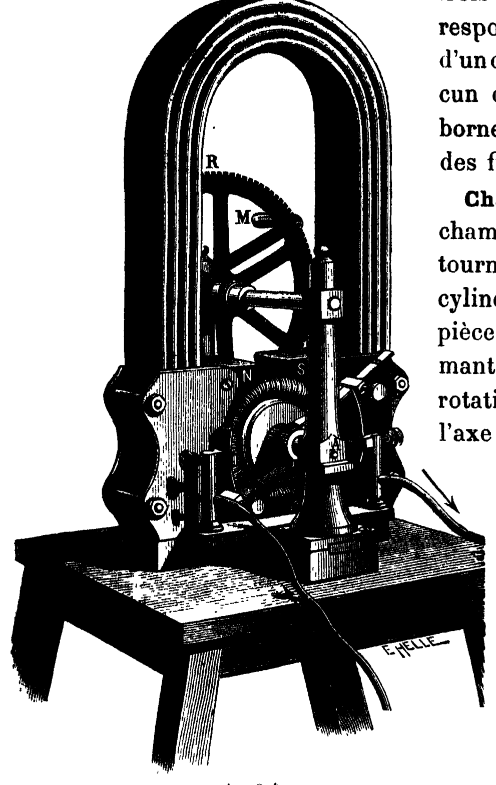


Fig. 960.

Champ magnétique. — Le champ magnétique dans lequel tourne l'anneau est une cavité cylindrique creusée dans les pièces polaires N et S d'un aimant fixe (fig. 960). L'axe de rotation A de l'anneau est l'axe de la cavité cylindrique.

Flux de force du champ magnétique. — Les lignes de force, en sortant du pôle nord N, se bifurquent pour gagner circulairement le pôle sud S par le fer de l'anneau (fig. 961). Aucune ligne de force ne pénètre dans la cavité de l'anneau.

Le flux de force franchit la petite épaisseur d'air, appelée *entrefer*, comprise entre le fer de l'anneau et les pièces polaires (1).

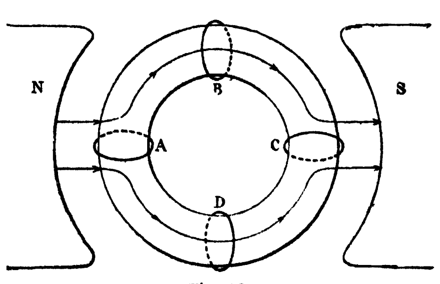


Fig. 961.

Que l'anneau tourne ou reste immobile, les lignes de force gardent une trajectoire *invariable* dans l'espace occupé par l'anneau.

791. Fonctionnement. — La rotation de l'anneau, dans le champ magnétique de l'aimant fixe, engendre un courant induit que

(1) L'entrefer constitue la plus grande partie de la réluctance (766) du circuit formé par l'aimant, l'entrefer et l'anneau ; il loge le fil du pourtour extérieur de l'anneau.

l'on utilise dans un circuit extérieur relié aux deux balais B.

Un courant induit prend naissance dans chaque spire qui tourne avec l'anneau; en effet, *le flux qui la traverse est constamment variable.* Le flux enveloppé est *maximum* dans le plan MM′ (fig. 962) où les lignes de force de l'anneau présentent leur maximum de concentration. Le flux diminue ensuite quand la spire s'éloigne du plan MM′, il est *nul quand le plan de la spire est* perpendiculaire à MM′.

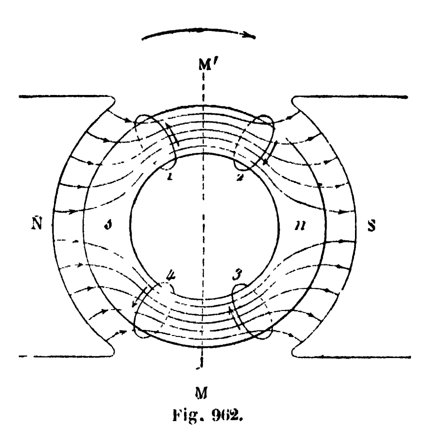


Fig. 962.

Une flèche représente le sens de la rotation imprimée à l'anneau par une force motrice extérieure. Nous déterminerons le sens du courant induit pour les spires 1 et 2 situées au-dessus du plan perpendiculaire à MM′ et pour les spires 3 et 4 qui occupent des positions symétriques des premières par rapport à ce plan (fig. 962).

Spire 1. — La spire 1 se rapprochant de M′, le flux inducteur qu'elle enveloppe va *en croissant;* d'après la loi de Lenz, son flux induit doit la traverser *en sens inverse* du flux inducteur; pour cela, le courant induit de la spire 1 présente à M′ sa face sud, il est *centrifuge* par rapport à l'axe de rotation, sur la partie antérieure de la figure.

Spire 2. — La spire 2 s'éloigne de M′, le flux inducteur qu'elle enveloppe *décroît:* son flux induit la traverse *dans le même sens* que le flux inducteur, le courant induit de la spire 2 présente à M′ sa face sud, il est *centripète* sur la partie antérieure de la figure.

Spire 3. — La spire 3 s'approche de M, le flux inducteur qu'elle enveloppe *croît;* son flux induit la traverse *en sens inverse* du flux inducteur; le courant induit de la spire 3 présente à M sa face nord, il est *centripète* en avant de la figure.

Spire 4. — La spire 4 s'éloigne de M, le flux qu'elle enveloppe *décroît.* son flux induit a *le sens* du flux inducteur; le courant induit de la spire 4 présente à M sa face nord, il est *centrifuge* en avant de la figure.

Le courant de chaque spire change de sens à la traversée de MM′.

Courant induit total. — A un moment donné, toutes les spires situées *à gauche* du plan MM′ sont parcourues par des courants de même sens (*centrifuges*), qui s'ajoutent, puisque toutes les spires forment un seul fil. Les spires situées *à droite* du plan MM′ sont parcourues par des courants de sens contraires (*centripètes*).

Tout étant symétrique de part et d'autre du plan MM′, le courant

induit total de gauche est égal au courant induit total de droite et ces deux courants se détruisent pour une vitesse quelconque.

Captage du courant par le collecteur. — Deux piles P et P′, égales et opposées par leurs pôles de même nom, ou groupées en surface (**697**) (fig. 963) donnent des courants qui s'ajoutent dans un circuit extérieur AMB. De même, si l'on relie ici les balais par un conducteur extérieur à l'anneau, les spires de droite et les spires de gauche y donnent des courants égaux qui s'ajoutent. Une machine de Gramme fournit ainsi dans un circuit extérieur un courant continu qui reste constant tant que la vitesse de rotation ne change pas. Les balais sont les *pôles* de la machine.

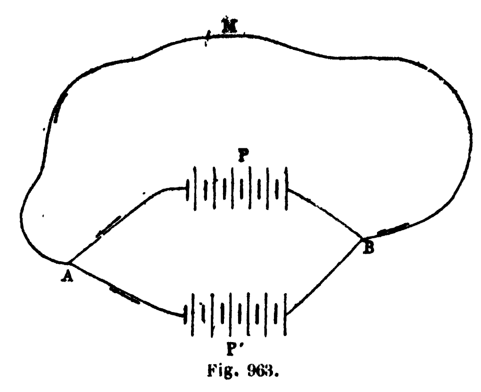


Fig. 963.

Plan neutre. — Dans le plan MM′, perpendiculaire à la ligne des pôles de l'aimant, le flux inducteur est *maximum*. Pour *une vitesse de rotation constante*, c'est au voisinage de ce plan que la variation du flux est la moins rapide. La force électromotrice développée dans une spire qui traverse le plan MM′ est nulle.

De part et d'autre du plan *neutre* MM′, les courants changent de sens, et c'est sur les génératrices du collecteur correspondant au plan neutre qu'on établit le contact des balais (fig. 958).

Dans le plan perpendiculaire à MM′ la variation du flux de force enveloppé par une spire est maximum et la force électromotrice est également maximum.

Calcul de la force électromotrice. — La quantité d'électricité qui parcourt un circuit induit, s'obtient en divisant par la résistance R du circuit la différence des flux de force enveloppés par le circuit entier au commencement et à la fin du temps considéré (**783**).

Le circuit extérieur, qui part des balais, est fixe ; il n'y a de variation de flux que dans le fil qui entoure l'anneau.

Calculons la force électromotrice induite moyenne qui se développe dans chaque moitié de l'anneau, pendant un quart de tour.

Pendant un quart de tour, de durée $\theta = \frac{1}{4n}$ (n est le nombre de tours par seconde), le flux qui traverse une spire varie de 0 à $\frac{\Phi}{2}$ (1), pour un nombre

(1) Φ est le flux *total* qui va d'un pôle à l'autre de l'aimant qui produit le champ magnétique.

total N de spires, il y a $\frac{N}{2}$ spires sur une moitié de l'anneau; la variation du flux pour une moitié de l'anneau pendant un quart de tour sera $\frac{N}{2} \cdot \frac{\Phi}{2}$, d'où la force électromotrice

$$\frac{N}{2} \cdot \frac{\Phi}{2} \cdot \frac{1}{\theta} = \frac{N\Phi}{4} 4n = n N\Phi .$$

Elle est proportionnelle au *nombre* N *de spires*, au *nombre n de tours par seconde*, au *flux de force* Φ du champ magnétique.

792. Source de l'énergie électrique produite. — Le travail dépensé pour faire tourner l'anneau s'accroît notablement quand le circuit extérieur est fermé. A circuit ouvert, il n'apparaît en effet qu'une différence de potentiel aux extrémités du fil induit. A circuit fermé, de l'énergie électrique est distribuée dans le circuit; elle représente l'accroissement du travail dépensé pour faire tourner la machine.

Calcul de l'énergie électrique utilisable. — Si l'on représente par une ordonnée E la force électromotrice aux pôles et si l'on développe le circuit total sur une horizontale où les longueurs sont proportionnelles aux résistances, la différence de potentiel aux pôles à circuit fermé sera e, inférieure à E (fig. 964), car la résistance ρ de l'anneau détermine une chute de potentiel, aussi bien que la résistance r du circuit extérieur. D'après la loi d'Ohm, l'intensité est donnée par :

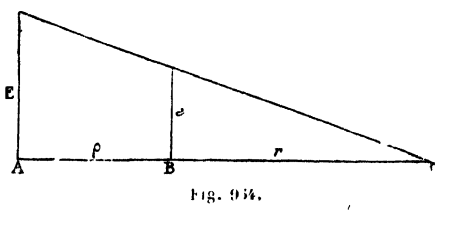


Fig. 964.

$$I = \frac{E - e}{\rho} = \frac{e}{r}$$

L'énergie dépensée comprend, outre l'énergie dissipée par les frottements dans la marche à vide : 1° un travail dissipé en chaleur dans l'anneau; 2° un travail distribué dans le circuit extérieur. Ce travail utilisable est *par seconde* : $eI = e\,\frac{E - e}{\rho}$. Comme on a : $e + E - e = E$, le produit $e\,(E - e)$ est maximum pour $e = E - e$, d'où $e = \frac{E}{2}$, et $r = \rho$. Alors $I = \frac{E}{2\rho}$ et le travail maximum par seconde est $\frac{E^2}{4\rho}$; le rendement $\frac{eI}{EI} = \frac{e}{E}$, est alors $\frac{1}{2}$.

Pertes d'énergie par hystérésis et par les courants de Foucault. — L'aimantation de l'anneau changeant de sens à chaque demi-révolution, il y a production de chaleur et perte d'énergie dans l'aimantation et dans la désaimantation, par *hystérésis*.

Le déplacement de l'anneau dans le champ magnétique détermine, d'autre part, dans sa masse des courants induits inutilisables (**780**), dits *courants de Foucault*, parallèles aux courants induits du fil de l'anneau; on les atténue en formant l'anneau de fils de fer isolés.

Une machine thermique n'utilise qu'une faible partie de la chaleur qu'elle dépense; une machine d'induction restitue un travail qui atteint 85 à 95 % de l'énergie mécanique qui la fait mouvoir.

793. Machines industrielles. — Pour les applications indus-

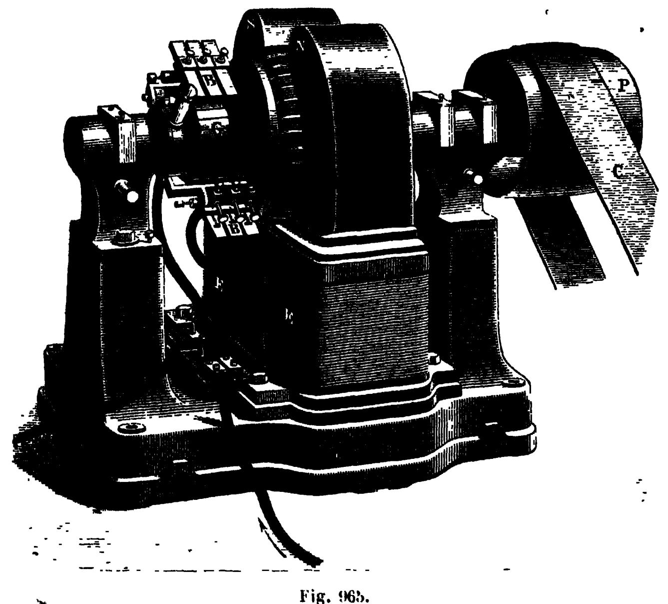


Fig. 965.

trielles, on accroît considérablement le flux de force inducteur en substituant à l'aimant fixe un électroaimant (1).

L'électroaimant inducteur se compose de deux noyaux en fer autour desquels est enroulé le fil excitateur. Les noyaux sont réunis en bas par une *culasse;* ils sont terminés en haut par des pièces polaires, N et S, évidées en deux demi-cylindres entre lesquels

(1) Le champ magnétique dû à un aimant permanent n'occasionne aucune dépense; l'emploi d'un électroaimant exige par seconde une énergie i^2r, i désignant l'intensité du courant excitateur, et r la résistance du fil de l'électroaimant; mais, d'autre part, le champ magnétique d'un électroaimant peut devenir très intense.

tourne l'anneau (fig. 965). Les balais B frottent sur le collecteur G. Une poulie P centrée sur l'axe de rotation entraîne une courroie C.

Production du champ magnétique inducteur. — Si l'électroaimant E est animé par une machine auxiliaire ou *excitatrice*, le circuit inducteur est indépendant du circuit induit (fig. 966).

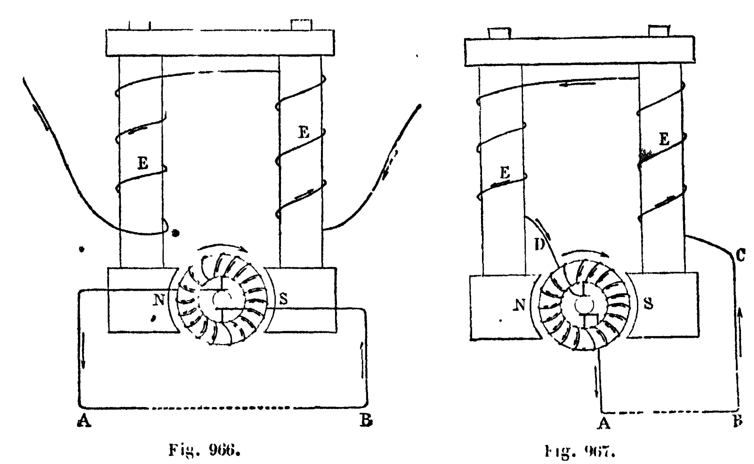


Fig. 966. Fig. 967.

On rend la machine *autoexcitatrice* en dirigeant dans l'électroaimant le courant même de l'anneau. L'anneau, l'électroaimant et le circuit extérieur, associés *en série*, ne forment alors qu'un seul circuit (fig. 967).

Quand l'anneau est mis en mouvement, la petite aimantation *rémanente* (**762**) des noyaux de l'électroaimant produit, par induction dans l'anneau, un courant *faible* (1) qui excite l'électroaimant; on arrive graduellement à la valeur de régime. La machine est alors *amorcée*.

Dans une machine excitée en série, un accroissement de la résistance extérieure réduit l'intensité du courant inducteur et diminue la force électromotrice induite.

Si l'on ne fait passer dans l'électroaimant qu'une partie du courant de l'anneau, la machine est dite excitée *en dérivation* (2). Dans ce cas, lorsque la résistance extérieure augmente, une plus forte partie du courant passe dans le fil inducteur et, pour une même vitesse de rotation, la force électromotrice induite augmente.

Nombre de spires de l'anneau. — Comme dans le cas des piles (**697**), on augmente le nombre des spires de l'anneau si la résistance extérieure est forte (machine à *haut potentiel* et à petit débit); on prend un petit

(1) Si les électroaimants sont à l'état neutre ou si leur magnétisme est de signe contraire à celui de la marche normale, la machine ne s'amorce pas. Il faut alors lancer dans le circuit d'aimantation un courant qui communique aux noyaux une aimantation rémanente de sens convenable.

(2) Une dynamo excitée en série ne s'amorce pas à circuit extérieur ouvert, aucun courant ne circulant dans l'inducteur; une dynamo excitée en dérivation s'amorce dans le même cas, car le circuit induit est toujours fermé sur les balais.

nombre de spires à gros fil si la résistance extérieure est faible (machine à *faible potentiel* et à grand débit).

MOTEURS ÉLECTRIQUES

794. Réversibilité de la machine de Gramme. — *On dépense de l'énergie mécanique* pour faire tourner un anneau de Gramme entre les pôles de l'inducteur; le travail mécanique dépensé est *converti en énergie électrique,* distribué par le courant sous diverses formes, dans le circuit extérieur.

Inversement, si par les balais, on dirige un courant dans l'anneau, l'aimant exerce sur l'anneau une action électromagnétique qui est tangente à l'anneau et le fait tourner. La machine devient un **moteur**, elle entraîne des appareils reliés à son axe par une poulie et une courroie (fig. 965). L'énergie électrique du courant est alors en partie *transformée en travail mécanique.*

La possibilité de transformer un travail mécanique en énergie électrique, ou de transformer une énergie électrique en travail, constitue la *réversibilité.* Le courant dirigé dans l'anneau est emprunté à une pile ou à une machine de Gramme *génératrice;* la machine qui reçoit le courant et fonctionne comme moteur est *réceptrice.*

795. Fonctionnement du moteur de Gramme. — Dans la figure 968, le courant qui arrive par les balais et parcourt les spires de l'anneau est centrifuge sur la partie antérieure des spires de gauche, il est centripète sur la partie antérieure des spires de droite. La circulation de courants *en sens contraires* dans les spires de gauche et dans les spires de droite imprime à l'anneau une rotation continue.

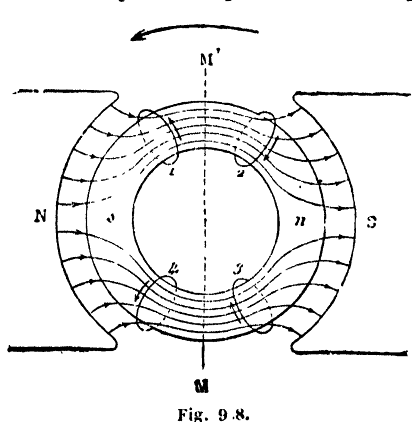


Fig. 968.

En effet, d'après la règle des actions électromagnétiques (**742**) le déplacement d'une spire dans un champ magnétique est tel que *le flux de force qu'elle enveloppe tende à devenir maximum.*

Considérons *quatre spires :* d'une part, les spires 1 et 2 situées au-dessus du plan horizontal NS qui passe par l'axe de rotation de l'anneau et d'autre part, les spires 3 et 4 symétriques de 1 et 2 par rapport au même plan NS.

D'après le sens du courant qui la traverse, la spire 1, présente sa face sud à la partie M' du plan vertical MM' : le flux qu'elle enveloppe et qui est dû à l'anneau pénètre par sa face nord et est contraire à son flux propre, il doit donc décroître et elle s'éloigne de la verticale vers la gauche.

La spire 2 présente sa face sud à la partie M' du plan vertical MM' ; son flux propre est de même sens que le flux de l'anneau ; la spire doit se diriger vers la gauche en se rapprochant du plan vertical MM' afin de faire croître le flux qu'elle enveloppe.

Par les spires 3 et 4, l'anneau est encore entraîné *dans le même sens* (1).

Rendement d'un moteur électrique. — Supposons une génératrice et une réceptrice identiques, à excitation indépendante de l'anneau.

Si l'on empêche la réceptrice de tourner, toute l'énergie électrique du courant de la génératrice se distribue dans le circuit entier et se transforme en chaleur. Si on laisse tourner la réceptrice, une force contreélectromotrice e prend naissance dans son anneau ; car celui-ci tourne dans un champ magnétique et devient le siège d'un courant induit qui gêne le mouvement. L'intensité du courant diminue donc ; lorsque le régime de marche est établi, elle devient $I = \frac{E - e}{R}$; R est la résistance totale du circuit. La puissance de la génératrice ou l'énergie qu'elle développe en une seconde est EI ; la chaleur dégagée dans le circuit total n'est plus que $(E - e)I$, la différence eI est la puissance de la réceptrice.

Le *rendement électrique* est $\frac{eI}{EI}$ ou $\frac{e}{E}$. La *puissance* est eI ou $\frac{e\,(E - e)}{R}$.

Quand la vitesse de rotation augmente, e tend vers E, la puissance diminue, mais le rendement tend vers l'unité.

La somme $e + E - e$ étant constante, le produit $e\,(E - e)$ est maximum quand les facteurs sont égaux, ce qui donne $e = \frac{E}{2}$ et $I = \frac{E}{2R}$; la puissance eI est alors $\frac{E^2}{4R}$ et le rendement $\frac{e}{E} = \frac{1}{2}$.

La puissance effective, que l'on mesure au frein sur le moteur, est toujours inférieure à la puissance théorique.

796. Avantages des moteurs électriques. — La génératrice peut être mise en mouvement, soit par une machine à vapeur, soit par une *force naturelle* (vent ou chute d'eau). Si le courant de la génératrice est transmis à une réceptrice éloignée on dit qu'il y a *transport de travail ou d'énergie à distance*. Ce transport a lieu par des fils flexibles qui se prêtent aux changements de direction ; il permet d'utiliser des énergies éloignées des centres industriels. L'énergie transportée est ensuite distribuée en divers points.

(1) Parcourus par un courant de même sens, les induits de la génératrice et de la réceptrice tournent en sens inverses ; c'est l'image de l'utilisation de l'énergie d'un poids qui tombe en soulevant un autre poids par l'intermédiaire d'une poulie.

Transport d'énergie à distance. — En résumé, un transport électrique d'énergie comprend : 1° un *générateur* (pile ou dynamo), qui transforme une énergie quelconque en énergie électrique; 2° un *récepteur* (moteurs, lampes, inscripteur Morse, téléphone), qui convertit l'énergie électrique en travaux variés; 3° des *fils métalliques* qui relient le générateur et le récepteur.

Voitures électriques. — Les roues sont entraînées par un moteur électrique. Le courant qui anime le moteur peut être fourni par des accumulateurs, portés comme le moteur, par la voiture elle-même. Dans les *tramways électriques à trolley*, le courant vient d'une dynamo placée à l'une des extrémités de la ligne. Un des conducteurs qui relient la génératrice à la réceptrice est *aérien* et porté par des poteaux, ou *souterrain* et logé dans une conduite qui présente une fente longitudinale continue. Un contact permanent est établi, entre ce conducteur et le moteur, par le frottement d'une roulette en bronze appelée *trolley*, portée par une tige métallique isolée que la voiture entraîne dans son mouvement. Le courant retourne par les rails du moteur à la source.

COURANTS ALTERNATIFS

797. Un courant variable qui reprend la même valeur à des intervalles de temps égaux est appelé *périodique*. La **période** est l'intervalle de temps qui sépare deux valeurs égales de l'intensité.

Si le courant périodique a un certain sens pendant une partie de la période et le sens opposé pendant le reste de la période, il est **alternatif**. En portant les temps en abscisses sur un axe horizontal et les intensités du courant en ordonnées sur des verticales, les points figuratifs sont situés au-dessus, puis au-dessous de l'axe horizontal, selon qu'ils correspondent à l'un ou l'autre des deux sens successifs du courant (fig. 969). On appelle plus spécialement alternatif un courant dont la période se compose de deux demi-périodes pendant lesquelles les courants sont égaux en intensité, mais de sens contraires.

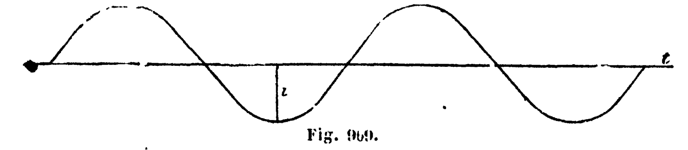


Fig. 969.

Le courant est sinusoïdal si les ordonnées sont exprimées par la relation $i = I \sin 2\pi \frac{t}{T}$ (fig. 969).

798. Courant alternatif sinusoïdal. — Un cadre qui tourne, avec une vitesse angulaire constante ω, dans un champ magnétique *uniforme*, autour d'un axe non parallèle à la direction des lignes de force, est traversé par un courant alternatif sinusoïdal. La période, égale à la durée d'un tour du cadre est $T = \frac{2\pi}{\omega}$.

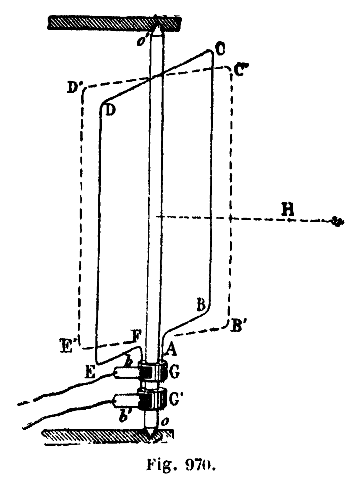


Fig. 970.

Supposons l'axe de rotation oo' *vertical* et la force H du champ magnétique *horizontale* (fig. 970); le flux intercepté par le cadre est maximum quand le cadre est en CD, perpendiculaire aux lignes de force du champ magnétique; pour une surface S du cadre, le flux a alors pour valeur HS.

Prenons l'origine du temps à la position CD du cadre, la valeur du flux intercepté, à l'instant t, dans la position C'D', pour un écart angulaire ωt du cadre avec la position d'origine, est $HS \cos \omega t$ (fig. 971).

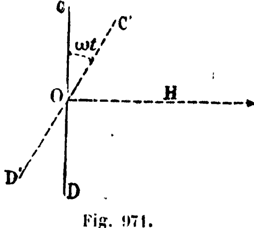


Fig. 971.

La force électromotrice e d'induction, au temps t, est égale à la vitesse de variation du flux de force, ou à la dérivée du flux (**783**).

$$e = \omega HS \sin \omega t = E \sin \omega t.$$

Elle est *maximum*, E, pour $\sin \omega t = 1$ (flux nul), aux temps $\frac{T}{4}, \frac{3T}{4}$.... Elle est *nulle* pour $\omega t = 0$ (flux maximum), ou aux temps $0, \frac{T}{2}, T$.

Les extrémités du fil du cadre sont reliées respectivement à deux bagues isolées, G et G', fixées sur l'axe de rotation; deux balais b et b', qui frottent sur ces bagues, aboutissent à un circuit extérieur.

Lorsque le cadre est dépourvu de self-induction appréciable, la force électromotrice due au champ magnétique extérieur existe seule; *l'intensité du courant induit* est, à chaque instant, égale au quotient de la force électromotrice e par la résistance R du circuit :

$$i = \frac{\omega HS}{R} \sin \omega t = \frac{E \sin \omega t}{R} = I \sin \omega t.$$

$$I = \frac{\omega HS}{R} \text{ est l'intensité maximum.}$$

L'intensité suit, dans ce cas particulier, les variations de la force électromotrice. En même temps qu'elle, elle est maximum, s'annule, change de signe; en d'autres termes, ***la force électromotrice et l'intensité sont en concordance de phase;*** leurs deux sinusoïdes représentatives ont les mêmes points d'intersection avec l'axe des temps.

MACHINES INDUSTRIELLES A COURANTS ALTERNATIFS

Les machines industrielles qui fournissent des courants alternatifs sont des alternateurs. Nous prendrons comme types : 1° une machine de Siemens à induit mobile; 2° un alternateur où l'induit est fixe tandis que l'inducteur est mobile.

799. Machine de Siemens. — *Description* (fig. 972). — L'induit se compose d'une couronne de bobines plates A, B, C formées d'un même fil; les bobines A, C... sont enroulées dans un sens. et les bobines B, D... en sens contraire. Ces bobines sont supportées par un disque, mobile autour de son axe, dans un champ magnétique. Ce champ est formé par les pôles de *deux séries parallèles d'électroaimants fixes;* les noyaux de chaque série sont montés sur un bâti circulaire en fonte. Les pôles en regard de deux électroaimants sont de noms contraires; il en est de même des pôles de deux électroaimants contigus. On obtient *l'alternance des pôles* des électroaimants en les formant du même fil, enroulé en sens contraire de l'un à l'autre. On lance dans ce fil le courant d'une machine auxiliaire à courants continus, dite *excitatrice.*

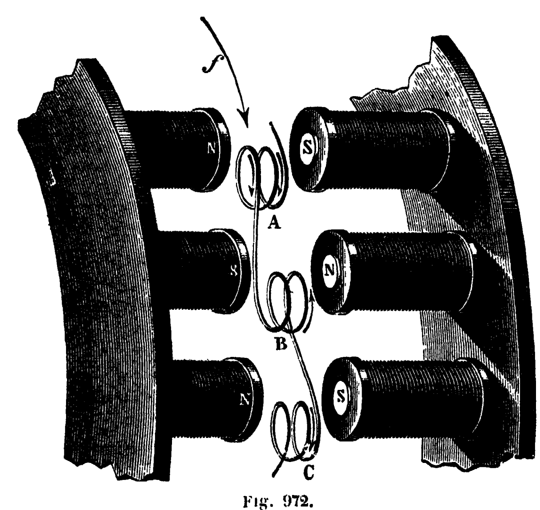


Fig. 972.

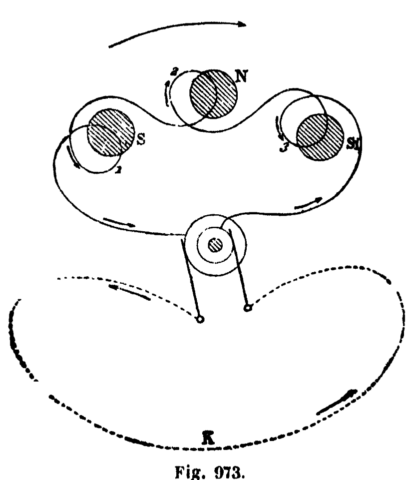


Fig. 973.

Les bobines mobiles de *l'induit à disque* sont *en même nombre* que les électroaimants de chaque bâti et remplissent sensiblement l'intervalle des pôles fixes en regard.

Les deux extrémités du fil induit aboutissent sur l'axe de rotation à deux bagues métalliques isolées, sur lesquelles frottent des balais qui dirigent le courant dans un circuit extérieur K (fig. 973).

Soient S N S... les pôles d'une des couronnes inductrices fixes et, au dessus, les bobines mobiles 1, 2, 3, entraînées dans le sens de la flèche *f;* les pôles contraires N' S' N' de la deuxième couronne fixe sont sur un plan antérieur non figuré et se projettent sur les pôles S N S... Les flux de force inducteurs compris entre les pôles des deux séries d'électroaimants ont des sens alternativement contraires. Les bobines mobiles coupent successivement ces flux.

Fonctionnement. — Au moment où les bobines mobiles impaires sont traversées par un flux positif, les bobines paires le sont par un flux négatif. A un même instant, les courants de 1 et de 2 sont donc de sens contraires, la bobine 3 se comporte comme 1, et 4 comme 2. Les courants développés dans toutes les bobines s'ajoutent arithmétiquement, en raison du sens inverse de l'enroulement sur les bobines de parités différentes.

Calcul de la force électromotrice moyenne d'induction. — Soit H*s*

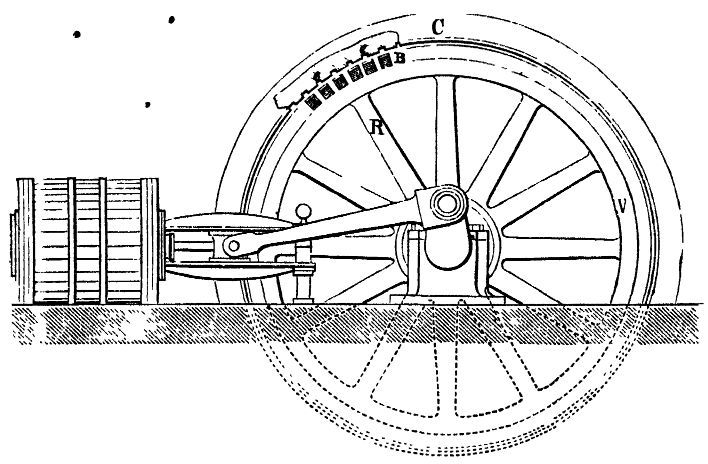


Fig. 974.

le flux qui traverse la surface *s* des spires d'une bobine 1 qui se projette sur S; cette bobine traverse un flux — H*s* quand elle est venue en face de N, la variation totale est 2H*s*. Si θ est la durée du passage de S en N, $\frac{1}{10^8} \cdot \frac{2Hs}{\theta}$ est en volts la force électromotrice moyenne d'induction.

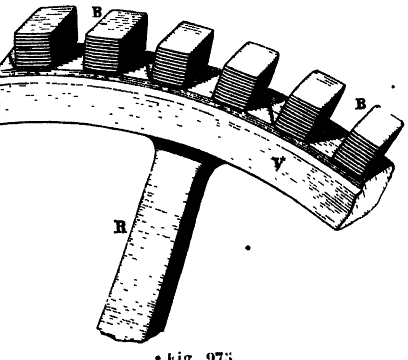


Fig. 975.

800. Alternateurs à induit fixe. — Le système inducteur consiste en un volant R sur la jante V duquel sont montés des électro aimants radiaux équidistants (fig. 974) ; ce volant est entraîné par un moteur. Un fil continu est enroulé sur les élec-

troaimants dans un sens tel que les pôles extérieurs sont alternativement nord et sud (fig. 975). Le courant excitateur d'une dynamo à courant continu, arrive par deux bagues ajustées sur l'axe du volant et sur lesquelles appuient des frotteurs.

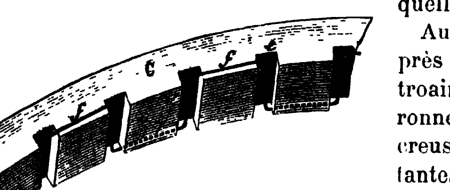


Fig. 976.

Autour du volant et très près des extrémités des électroaimants se trouve une couronne de fer C (1). Elle est creusée d'encoches équidistantes *e*, en nombre égal au nombre des pôles et occupées par des fils de cuivre *f* qui forment des bobines rectangulaires et subissent l'induction (fig. 976). Avec N électroaimants et *n* tours du volant par seconde, il y a N*n* changements de sens du courant par seconde.

Les alternateurs à induits fixes sont préférables pour obtenir des potentiels très élevés, car l'induit n'a aucune pièce mobile; les courants sont recueillis par deux bornes fixes.

EFFETS DES COURANTS ALTERNATIFS

801. Répétons avec un courant alternatif les expériences que l'on réalise habituellement avec un courant continu.

1° Quand on ferme par un fil métallique ou par une lampe à incandescence le circuit d'un alternateur, le fil s'échauffe, ou la lampe s'illumine; l'**échauffement** ne dépend pas de la direction du courant. Le courant alternatif sert de même à entretenir des lampes à arcs électriques.

2° En traversant un **galvanomètre**, un courant alternatif ne donne aucune déviation; on n'observe qu'une vibration de l'aiguille ou du cadre mobile autour de la position de repos.

3° Quand un courant alternatif est dirigé dans un **électroaimant**, le noyau s'aimante et peut attirer un contact de fer doux. Le contact tend à se détacher toutes les fois que le courant s'annule, mais le retour immédiat d'un courant détermine une nouvelle attraction (2).

(1) Il se produit dans les masses métalliques des machines à courants alternatifs des courants de Foucault, qui contrarient les variations des flux actifs. On rend ces courants négligeables en *sectionnant* les noyaux de fer des électroaimants (parallèlement à l'axe des bobines) et même le bâti. Ces courants induits, parasites, exigent une dépense d'énergie qui est une perte. La production de chaleur par *hystérésis* est une autre perte : elle n'est pas diminuée par le sectionnement des noyaux; on la réduit en formant les noyaux avec du fer très pur.

(2) On entend un son analogue à un ronflement, en outre, le noyau s'échauffe.

4° Un **électrodynamomètre** se comporte avec un courant alternatif comme avec un courant continu, si le courant a, au même instant, la même direction dans la bobine fixe et dans la bobine mobile, car le changement de sens a lieu à la fois dans les deux bobines.

5° Un courant alternatif **décompose** les composés chimiques qu'il traverse, mais *ne sépare pas* leurs éléments. Il est, par suite, inutilisable pour l'électrolyse, la galvanoplastie et la charge des accumulateurs. Dans le passage à travers l'eau, le gaz qui se dégage à chacune des électrodes est un mélange d'hydrogène et d'oxygène.

Pour une très grande fréquence, les actions chimiques et magnétiques n'ont plus lieu.

6° Les courants alternatifs donnent enfin lieu à des effets **d'induction**, dont le rôle pratique est important.

Intensité d'un courant alternatif. — L'intensité moyenne d'un courant alternatif est nulle, le débit oscille, en effet, continuellement entre une valeur positive maximum et une valeur négative maximum égale en passant par zéro. Mais un courant alternatif échauffe un circuit comme le ferait un courant continu, et c'est par son effet calorifique qu'on le mesure.

On appelle **intensité efficace** d'un courant alternatif l'intensité du courant continu qui dégage, *dans le même temps, la même quantité de chaleur dans le même circuit*. Quelles que soient la fréquence et la forme du courant, l'intensité efficace s'évalue en *ampères;* on la mesure avec un *ampèremètre thermique*, où la dilatation d'un fil métallique fin fait déplacer une aiguille indicatrice. La graduation d'un ampèremètre thermique se fait avec des courants continus dont l'intensité est donnée par un ampèremètre ordinaire. L'intensité efficace i_f est inférieure à l'intensité maximum I; pour un courant *sinusoïdal*, $i_f = \frac{I}{\sqrt{2}}$.

On appelle **force électromotrice efficace** la force électromotrice du courant continu qui dégage la même quantité de chaleur dans le même circuit. En désignant par E la force électromotrice maximum, la force électromotrice efficace est, pour un courant sinusoïdal, $e_f = \frac{E}{\sqrt{2}}$. La force électromotrice efficace s'évalue en *volts* et se mesure avec un *voltmètre thermique*, à fil métallique chauffé par le courant. Le voltmètre étant installé en dérivation et la fraction de courant qui le traverse devant être très faible, la dérivation comprend, en dehors du fil chaud, une résistance importante, sans

self-induction. La graduation se fait avec un courant continu.

Pour mesurer la **fréquence** d'un courant alternatif on peut aligner le long des pôles d'un électroaimant des *lames vibrantes en acier* dont la période propre de vibration est croissante et marquée sur la lame. L'électroaimant étant excité par le courant alternatif, il part du pôle qui est voisin des extrémités libres des lames un flux de force magnétique alternatif qui exerce sur les lames des attractions et des répulsions successives. La lame dont la fréquence propre est la *plus voisine de la fréquence* du courant alternatif est celle qui prend, en vibrant, l'*amplitude maximum*.

Oscillographe. — C'est un appareil à oscillations *très rapides* et très amorties qui obéit, à chaque instant, à la force électromagnétique d'un courant alternatif et donne la *courbe des intensités* du courant.

Il se compose d'un *puissant aimant vertical* à fer à cheval NS (fig. 977), entre les pôles duquel est tendu par une vis V un petit *ruban plat a,* de fer doux, de quelques centièmes de millimètre d'épaisseur et de $0^{mm},2$ de largeur (fig. 978). La tension est réglée pour que la période propre d'oscillation du ruban soit au moins cent fois plus courte que la période du courant.

Fig. 977. Fig. 978. Fig. 979.

De chaque côté du ruban, sont disposées deux bobines B et B' dans lesquelles on peut faire passer le courant alternatif à étudier (fig. 979).

Quand il ne passe pas de courant dans les bobines, chaque élément horizontal du ruban se comporte comme un petit aimant qui s'oriente suivant les lignes de force du champ magnétique et les reçoit par sa tranche.

Le courant alternatif créant une force magnétique perpendiculaire à celle de l'aimant NS, le ruban tend à présenter à chaque instant *sa tranche* à la résultante des deux forces magnétiques; la *torsion du ruban est proportionnelle à l'intensité* du courant.

Un très petit miroir *m*, collé sur l'une des faces du ruban, réfléchit un rayon lumineux sur un papier sensible; le papier se déplace par l'action d'un moteur synchrone du courant alternatif et, pendant une période, son déplacement est proportionnel à la durée de la période.

SELF-INDUCTION D'UN COURANT ALTERNATIF

802. Des forces électromotrices de self-induction ne prennent naissance pour un courant continu qu'à la fermeture et à l'ouverture; elles interviennent *pendant toute la durée* d'un courant alternatif, puisque le flux de force enveloppé varie alors à tout instant.

Pour un cadre tournant dans un champ magnétique uniforme (**798**), le changement de sens du courant, s'il y a self-induction, n'a plus lieu quand le cadre est normal aux lignes de force du champ, mais quand il a dépassé, dans sa rotation, cette position d'un angle θ. Sans self-induction l'intensité du courant, à un temps t, était $I \sin \omega t$; avec self-induction, elle est $I' \sin (\omega t - \theta)$.

La force électromotrice e, due au champ magnétique extérieur est $E \sin \omega t$; la force électromotrice e' de self-induction représentée par $L \frac{di}{dt}$ (**784**) se retranche de e quand i augmente $\left(\frac{di}{dt} \text{ positif}\right)$, s'ajoute quand i diminue $\left(\frac{di}{dt} \text{ négatif}\right)$. L'intensité i a donc pour expression :

$$i = \frac{E \sin \omega t - L \frac{di}{dt}}{R}, \qquad \text{d'où } E \sin \omega t = Ri + L \frac{di}{dt}.$$

L'intensité i, à un instant donné, est une fonction périodique, de même période que la force électromotrice $E \sin \omega t$; on peut lui attribuer la forme $I' \sin (\omega t - \theta)$ (1). D'après cela,

$$Ri = RI' \sin (\omega t - \theta)$$

$$\text{et } L \frac{di}{dt} = LI'\omega \cos (\omega t - \theta) = LI'\omega \sin \left(\omega t - \theta + \frac{\pi}{2}\right).$$

On connaît E, R, L, ω; mais θ et I' sont inconnus.

Construction graphique (fig. 977). — La fonction sinusoïdale $E \sin \omega t$ est la somme algébrique de deux autres fonctions sinusoïdales de même période, puisque $E \sin \omega t = RI' \sin (\omega t - \theta) + LI'\omega \sin \left(\omega t - \theta + \frac{\pi}{2}\right)$; d'après cela, le vecteur amplitude E est la somme géométrique des deux vecteurs RI' et $LI'\omega$, pris avec leurs directions

$$-\theta \text{ et } -\theta + \frac{\pi}{2} \text{ (565).}$$

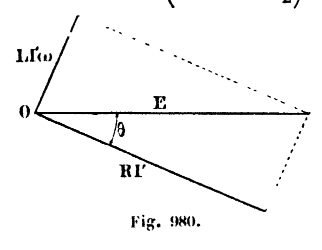


Fig. 980.

Au point O, on mène RI' dans une direction qui fait un angle $-\theta$ avec E, qu'on a dirigé horizontalement; puis, en O, on porte $LI'\omega$ dans une direction qui fait un angle $\frac{\pi}{2}$ avec RI'. La diagonale du parallélogramme de RI' et $LI'\omega$ est la longueur E. On en déduit les inconnues θ et I'.

$$tg\, \theta = \frac{LI'\omega}{RI'} = \frac{L\omega}{R}, \qquad \cos \theta = \frac{R}{\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}}$$

Le retard θ de i sur e est d'autant plus grand que L et ω sont plus grands et que R est plus petit. Le retard maximum est $\frac{\pi}{2}$;

d'après la figure, $RI' = E \cos \theta$ d'où $I' = \frac{E \cos \theta}{R}$ et $i'_f = \frac{I'}{\sqrt{2}}$

(1) Une cause périodique produit un effet qui doit devenir périodique et de même période, après un temps variable d'établissement ; l'état définitif est atteint après un certain nombre de tours du cadre tournant.

En définitive $i = \frac{E}{\sqrt{R^2 + L^2\omega^2}} \sin(\omega t - \theta)$.

La self-induction a pour effet de *réduire l'intensité* et de lui donner *un retard de phase* sur l'intensité sans self-induction.

Bobine à réduction d'intensité. — Quand un courant alternatif comprend dans son circuit une bobine à noyau de fer doux, le coefficient de self-induction L est considérable à cause de la grande valeur du flux de force qui parcourt le noyau; l'angle θ se rapproche de $\frac{\pi}{2}$; la valeur de I' est très réduite. En enfonçant plus ou moins le noyau dans la bobine, on règle I' et par suite i_f. Le réglage se fait *sans absorber d'énergie;* car l'affaiblissement du courant est produit par une force électromotrice et non par une résistance qui dépenserait du travail calorifique.

Puissance. — La puissance P dans un conducteur parcouru par un courant sinusoïdal alternatif, est l'énergie que le courant fournit en une seconde. Quand toute la puissance est absorbée dans un conducteur de résistance r sous forme calorifique, on a, d'après la définition de l'intensité efficace, $P = ri_f^2$, et $ri_f^2 = r\frac{I^2}{2}$. Si le conducteur est dépourvu de self-induction, $I = \frac{E}{r}$, d'où $rI = E$ et $\frac{rI^2}{2} = \frac{EI}{2}$.

Quand le conducteur, de résistance r, présente de la self-induction, $I = \frac{E\cos\theta}{r}$ ou $rI = E\cos\theta$; de là $\frac{rI^2}{2} = \frac{EI\cos\theta}{2} = i_f\, e_f \cos\theta$ (1).

Pour un conducteur traversé par un courant alternatif, l'***intensité*** du courant, la ***différence de potentiel*** et la ***puissance*** sont à considérer à trois points de vue différents :

1° Valeurs dites instantanées i, e, p (ou pendant un temps très court à une époque t); les lois des courants continus sont applicables à ces valeurs; 2° valeurs maxima I, E, P; 3° valeurs efficaces : i_f, e_f, p_f. Pour un courant sinusoïdal, on a : $i_f = \frac{I}{\sqrt{2}}$, $e_f = \frac{E}{\sqrt{2}}$, $p_f = e_f\, i_f \cos\theta$.

EFFETS D'INDUCTION MUTUELLE

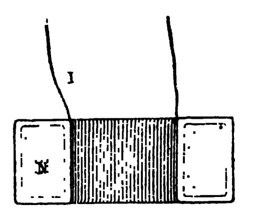
Par ses variations, un courant alternatif produit, sans interrupteur, des effets d'induction sur un circuit voisin.

Le courant induit est *alternatif* et *de même période* que le courant inducteur; mais il présente avec lui une *différence de phase*

(1) Les trois données : puissance p_f fournie par un wattmètre, i_f par un ampèremètre thermique, e_f par un voltmètre thermique, permettent de calculer cos θ qu'on appelle *facteur de puissance.*

d'un quart de période, car son maximum a lieu au moment où l'inducteur s'annule, et il devient nul quand l'inducteur est maximum. Les effets d'induction *mutuelle* sont appliqués dans les transformateurs pour le transport de l'énergie par courants alternatifs.

803. Transformateurs. — On enroule deux circuits distincts sur un noyau N de fils de fer (1); tantôt les deux circuits sont superposés comme dans une bobine d'induction ordinaire, tantôt ils recouvrent des parties différentes du noyau (fig. 981).



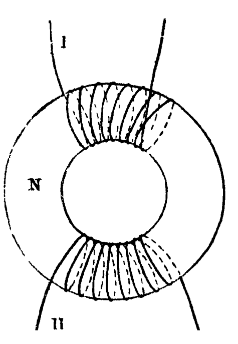


Fig. 981.

Si le circuit primaire I est parcouru par un courant périodique, le noyau devient le siège d'un flux variable, de même période et le circuit secondaire II présente aussi une force électromotrice alternative d'induction de même période.

Modes d'emploi des transformateurs. — 1° Soit un circuit *primaire à fil gros* et court et un *circuit secondaire à fil fin* et long. Un courant alternatif de grande intensité et de faible différence de potentiel, dirigé dans le fil primaire, détermine dans le fil secondaire un *courant alternatif induit de faible intensité et de grande différence de potentiel;* c'est le cas de la bobine de Ruhmkorff.

2° Faisons passer dans le fil fin un courant alternatif de faible intensité et de grande différence de potentiel, le fil court devient le siège d'un courant induit également alternatif, *qui a une grande intensité et une faible force électromotrice.* En effet, les courants induits dus aux très nombreuses spires du long fil s'ajoutent dans chacune des spires du fil court, ce qui donne lieu à un débit important; mais la force électromotrice induite est faible, car elle est la somme de différences de potentiel dans un petit nombre de spires.

Dans ces deux procédés, le même circuit a été successivement primaire et secondaire.

Résultats. — 1° *La puissance est sensiblement conservée.* Soient E_1 et I_1 la force électromotrice et l'intensité du courant primaire,

---

(1) Un noyau de fer doux *fermé*, comme un anneau de Gramme, permet d'obtenir un champ magnétique intense avec un courant magnétisant faible (**766**). Les lignes de force qui prennent naissance dans le noyau n'ont pas d'intervalle d'air à traverser. La bobine d'induction de Ruhmkorff est un transformateur à circuit magnétique ouvert,

E_2 et I_2 la force électromotrice et l'intensité du courant secondaire, on a $E_1I_1 = E_2I_2$. Un courant d'énergie E_1I_1 engendre ainsi un autre courant d'énergie égale E_2I_2; un transformateur fait varier à volonté les deux facteurs du produit constant EI.

2° Si l'on désigne par n_1 et n_2 les nombres de spires du primaire et du secondaire, par E_1 et E_2 les voltages correspondants :

$$\text{on a } \frac{E_2}{E_1} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Ce rapport *de transformation* caractérise le transformateur.

Applications des transformateurs. — Un transport d'énergie à distance n'est économique, que s'il a lieu *sous un très haut voltage* et avec une *faible intensité,* pour éviter l'accroissement trop coûteux des sections des conducteurs. D'autre part, le voltage des machines de Gramme à courant continu ne peut guère dépasser 500 volts, sans que le collecteur soit rapidement hors de service. Les alternateurs à bobines induites fixes dépassent considérablement ce voltage.

On produit directement, avec un alternateur, un courant *alternatif de haut voltage* (1), et on le transporte au loin par des conducteurs mis hors de portée. Comme il serait dangereux pour l'utilisation, on le transforme, à l'arrivée, en le faisant passer dans le long fil d'un transformateur. On recueille alors, aux bornes du fil court, un courant *alternatif de grande intensité et de petit voltage* (110 et même 50 volts) pour le courant des abonnés (2).

CONDENSATEUR DANS UN CIRCUIT ALTERNATIF

804. Un courant est arrêté par une interruption pratiquée dans son circuit. Si les deux extrémités de l'interruption sont reliées aux armatures d'un *condensateur,* un courant alternatif n'est pas suspendu, comme le serait un courant continu.

Le mécanisme du passage d'un courant alternatif se conçoit si l'on compare un circuit coupé par un condensateur à une conduite hydraulique, comprise entre deux réservoirs A et B, cloisonnée par un diaphragme CD imperméable, mais élastique (fig. 735).

Les réservoirs étant remplis d'eau *à une même hauteur,* le dia-

(1) Comme les alternateurs industriels ne dépassent pas 10 mille volts, on se sert quelquefois d'un transformateur pour réduire l'intensité et porter à 50 mille volts le voltage du courant alternatif d'une station génératrice.

(2) Pour effectuer une semblable transformation avec un courant continu, il faudrait faire tourner un moteur à la station de réception par un courant continu de haut voltage et s'en servir pour entraîner une dynamo de faible voltage.

phragme subit de part et d'autre des pressions égales et reste *plan*.

Si *l'on monte* A en même temps *qu'on descend* B, le diaphragme fléchit par une différence de pression (fig. 736) et produit un déplacement d'eau vers B. Le courant cesse quand la flexion du diaphragme est devenue maximum. Par des mouvements de va-et-vient des réservoirs, les flexions du diaphragme varient périodiquement en grandeur et en direction et entretiennent des *déplacements alternatifs* du liquide. Pendant le mouvement, le diaphragme est transitoirement plan lorsque la différence de pression s'annule.

Comme une self-induction, une capacité diminue la force électromotrice efficace ; au point de vue de la phase, *les effets d'une capacité sont opposés à ceux d'une self-induction*, car au lieu d'un retard de l'intensité, elle produit une avance.

L'introduction d'une capacité seule dans un circuit alternatif n'a pas d'intérêt pratique, mais on *annule le retard de phase* dû à une self-induction, en introduisant dans le circuit un condensateur convenablement choisi. Le circuit se comporte comme s'il avait simplement sa résistance, sans self-induction, ni capacité.

Dans un circuit à courant alternatif qui renferme à la fois une self-induction L et une capacité C, le coefficient L (**802**) de l'équation

$$E \sin \omega t = Ri + L \frac{di}{dt}$$

est remplacé par $L - \frac{1}{C\omega^2}$ (fig. 982) ; E sin ωt étant une fonction sinusoïdale, somme algébrique de deux fonctions sinusoïdales de même période que la sienne ; l'amplitude E est la somme géométrique de l'amplitude RI′ et de l'amplitude $\left(L - \frac{1}{C\omega^2}\right) I'\omega$ ou $LI'\omega - \frac{I'}{C\omega}$. Par rapport à l'horizontale E, ces deux amplitudes doivent être menées dans

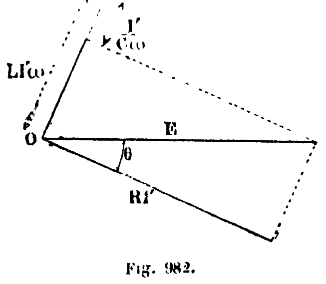


Fig. 982.

les directions $-\theta$ et $-\theta + \frac{\pi}{2}$; on a $tg\, \theta = \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R}$; l'angle θ n'est plus compris entre 0 et $\frac{\pi}{2}$, mais entre $-\frac{\pi}{2}$ et $+\frac{\pi}{2}$. Si $L\omega$ l'emporte, le courant est en retard sur la force électromotrice appliquée ; si $\frac{1}{C\omega}$ l'emporte, le courant est en avance. Il y a compensation lorsque $LC\omega^2 = 1$.

La compensation dépend de ω, c'est-à-dire de la fréquence ; réalisée pour une fréquence, elle ne l'est pas pour une autre.

La vérification de la compensation se fait avec un circuit qui comprend une capacité et une bobine dans laquelle on enfonce plus ou moins un noyau. Si le circuit renferme une lampe à incandescence, l'éclat de la lampe offre un maximum d'intensité quand on a enfoncé convenablement le noyau; alors $\theta = 0$ et $I = \frac{E}{R}$ est maximum et aussi i_f.

La puissance dans un circuit alternatif qui présente de la self-induction est $i_f e_f \cos\theta$, où $\cos\theta = \frac{R}{\sqrt{R^2 + L^2\omega^2}}$. L'expression de $\cos\theta$ montre que par le produit $L\omega$, la fréquence jointe à la self-induction diminue la puissance, on la relève par l'introduction d'une capacité dans le circuit, puisque $L\omega$ est remplacé par $L\omega - \frac{1}{C\omega}$.

MOTEURS A COURANTS ALTERNATIFS

Si l'on actionne par un courant continu les électroaimants d'un alternateur A et si l'on dirige dans le circuit de la couronne induite fixe le courant alternatif d'un alternateur distinct B, servant de générateur, le volant mobile se met à tourner; l'alternateur A se comporte alors comme un moteur.

On emploie surtout les moteurs *à champ magnétique tournant*, des alternateurs polyphasés produisent ce champ.

805. Courants polyphasés. — Nous supposerons que les valeurs instantanées de l'intensité d'un courant alternatif varient comme les ordonnées d'une sinusoïde. Quand deux sinusoïdes, de même période, coupent l'axe des temps aux mêmes points, et ont constamment des ordonnées de même sens, elles sont dites *en concordance de phase*. Elles présentent *une différence de phase* si les passages par zéro sont séparés par un intervalle.

Quand la différence de phase est d'une demi-période, les courbes coupent l'axe des temps aux mêmes points, mais les ordonnées sont constamment de sens contraires.

Dans les courants alternatifs appelés *diphasés* la différence de phase est d'un quart de période; elle est d'un tiers de période dans les courants alternatifs dits *triphasés*.

Courants diphasés. — A un instant donné, exprimons l'intensité d'un courant alternatif de période T par $i = I \sin 2\pi \frac{t}{T} = I \sin \omega t$,

l'intensité d'un second courant alternatif, de même période T et de même intensité maximum I, est $i' = I \sin 2\pi \frac{t + \frac{T}{4}}{T}$, si le second courant est en avance sur le premier d'un quart de période c'est-à-dire si le second courant a son intensité maximum quand le premier commence sa période. La différence de phase est $\frac{2\pi \frac{T}{4}}{T} = \frac{\pi}{2}$.(1)

Courants triphases. — Pour trois courants alternatifs, de même période, de même intensité maximum, présentant des différences de phases d'un tiers de période, les intensités instantanées sont :

$$i_1 = I \operatorname{Sin} \frac{2\pi t}{T},\ i_2 = I \operatorname{Sin} 2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{\frac{T}{3}}{T}\right),\ i_3 = I \operatorname{Sin} 2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{\frac{2T}{3}}{T}\right)$$ (2)

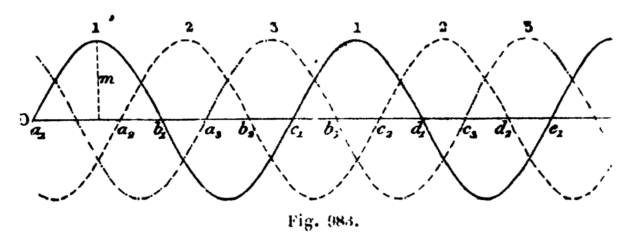


Fig. 983.

Les intensités des trois courants sont représentées par des sinusoïdes identiques (fig. 983). La courbe 1, en traits pleins, est en avance d'un tiers de période sur la courbe 2 et celle-ci est en avance d'un tiers de période sur la courbe 3. En ajoutant, à un temps quelconque, les valeurs instantanées des trois ordonnées, on voit que leur somme algébrique est nulle.

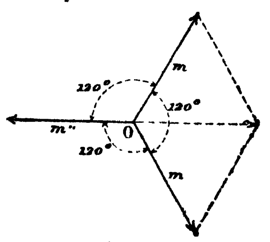


Fig. 984.

En appliquant à la composition géométrique des amplitudes la construction de Fresnel, la résultante de deux d'entre elles est égale et opposée à la troisième (fig. 984).

(1) *Alternateur diphasé.* — La couronne de l'induit est creusée de deux séries d'encoches équidistantes entre chaque intervalle de deux pôles consécutifs. La couronne induite loge ainsi dans les encoches un nombre de spirales double du nombre des pôles. Les spirales, reliées de deux en deux, forment deux séries indépendantes. La phase du mouvement périodique varie d'un quart de période de l'une à l'autre de ces deux séries. On a de cette façon deux circuits distincts parcourus par des courants alternatifs identiques, dont les intensités présentent une différence de phase d'un quart de période.

(2) *Alternateur triphasé.* — Entre chaque intervalle de deux pôles consécutifs, la couronne induite offre trois séries d'encoches équidistantes dans lesquelles sont logés trois circuits distincts formés de spirales reliées de trois en trois. De l'un des circuits au suivant, le courant alternatif varie d'un tiers de période.

806. Moteurs à champ tournant. — Les courants polyphasés ont la propriété de pouvoir produire, à l'aide de *bobines immobiles*, une force magnétique qui tourne d'un mouvement uniforme. On emploie dans ce but des courants diphasés ou triphasés.

Courants diphasés. — Dans deux paires d'électroaimants rectangulaires, A_1 et A'_1, A_2 et A'_2 ayant respectivement leurs pôles contraires en regard (fig. 982), on dirige deux courants sinusoïdaux de même période, de même amplitude et présentant une différence de phase d'un quart de période.

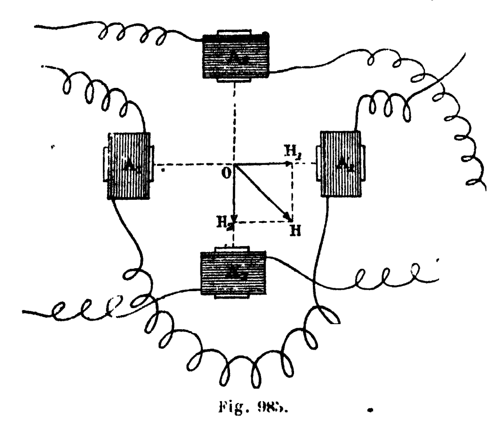


Fig. 985.

En un point O de l'espace interpolaire, les *forces* OH_1 et OH_2 produites par les deux paires d'électroaimants, sont rectangulaires; elles sont proportionnelles aux intensités des courants (1) et sinusoïdales; elles se composent suivant la règle du parallélogramme. A un instant t,

$$OH_1 = a \sin \omega t,\quad OH_2 = a \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = a \cos \omega t, \text{ d'où :}$$

$$OH = \sqrt{\overline{OH_1}^2 + \overline{OH_2}^2} = a \qquad HOH_1 = \alpha = \omega t$$

La force résultante OH est constante en grandeur. sa direction fait un angle variable α ou ωt avec l'une des composantes, elle fait un tour en une période, sa vitesse angulaire est $\omega = \frac{2\pi}{T}$.

On réalise cette force tournante, en mettant respectivement chacune des deux paires d'électro aimants en communication avec l'un des deux circuits d'un alternateur diphasé.

Courants triphasés. — On obtient de même une force constante, à rotation uniforme, avec trois paires d'électroaimants A_1 A'_1, A_2 A'_2, A_3 A'_3, faisant entre eux un angle de 120° et traversés respectivement par des courants sinusoïdaux dont les phases diffèrent d'un tiers de période (fig. 986); on relie pour cela chacune des paires d'électroaimants à l'un des trois circuits d'un alternateur triphasé.

(1) Un cadre circulaire, traversé par un courant, exerce sur un point de son axe, une action magnétique perpendiculaire à son plan et proportionnelle à l'intensité de son courant (**749**).

Rotation du moteur. — Si, dans le champ tournant, on place un disque ou un cylindre annulaire conducteur G mobile autour du même axe que la force, les courants induits qui prennent naissance dans le conducteur ont un sens tel que leur action électromagnétique contrarie le déplacement relatif de la force tournante, et. de ce fait, le conducteur tourne dans le même sens que la force.

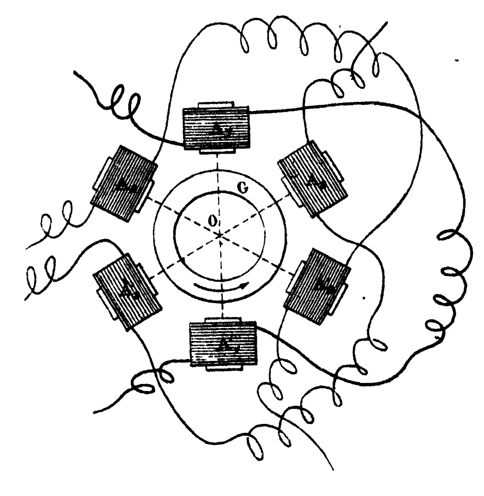


Fig. 986.

En entraînant des appareils dans sa rotation, le conducteur mobile constitue un moteur électrique [1].

Si, au centre de la couronne des bobines que parcourent les courants polyphasés, on installe, au lieu du cylindre annulaire G, un anneau de Gramme mobile, l'anneau tourne aussi dans le même sens que la force magnétique, par la réaction des courants induits dans ses spires. La partie des spires qui se trouve à l'intérieur de l'anneau étant inutile puisqu'elle ne coupe aucun flux de force et qu'il ne s'y développe pas de courants induits, on a été conduit à simplifier les dispositifs.

Dans le dispositif de la ***cage d'écureuil*** (fig. 987) [2], deux couronnes de cuivre C, réunies par des barreaux B de même métal, constituent le circuit dans lequel se développent les courants induits qui entraînent le moteur. L'intérieur de la cage est rempli par un *noyau* cylindrique en fer, feuilleté normalement à l'axe de rotation qui est l'axe du cylindre. Ce noyau est creusé suivant ses génératrices d'encoches équidistantes dans lesquelles sont logées les barres de cuivre, isolées du noyau, qui coupent le flux de force.

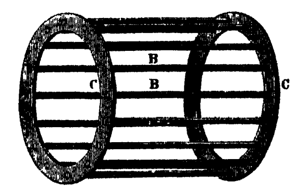


Fig. 987.

(1) Quand on fait tourner un aimant au-dessus d'un disque de cuivre mobile dans son plan autour d'un axe qui passe par son centre, les courants induits dans le disque par l'aimant tournant donnent lieu, d'après la loi de Lenz, à un effet électro-magnétique qui contrarie le déplacement relatif de l'aimant et du disque. Il en résulte que *le disque est entraîné dans le même sens que l'aimant.* Les vitesses du disque et de l'aimant ne peuvent devenir égales, car tout courant induit disparaîtrait en même temps que le déplacement relatif. Le disque de cuivre est un moteur dans un champ tournant, mais il faut ici un moteur pour faire tourner l'aimant.

(2) Débarrassé de son noyau, l'induit mobile ressemble à une cage d'écureuil.

Si aucune résistance ne ralentit son mouvement, la cage tend à prendre la vitesse de la force magnétique tournante. Quand on demande un plus grand travail au moteur, sa vitesse diminue ; en même temps, l'effort que développe la force magnétique pour l'entraîner doit augmenter.

Les ***moteurs à champ tournant*** ne comportent ni excitatrice, ni collecteur, ni bagues, ni prises de courant.

EFFETS LUMINEUX DU COURANT

On distingue : 1° les effets lumineux des **décharges électriques** ; 2° les effets lumineux des **courants,** soit *continus,* soit *alternatifs.*

DÉCHARGES DANS LES GAZ RARÉFIÉS

On peut employer les décharges des machines électrostatiques pour produire des effets lumineux dans les gaz raréfiés, mais la commodité de la bobine d'induction la fait souvent préférer. Le gaz raréfié est contenu dans un *tube de verre,* fermé à la lampe ; à l'intérieur, deux fils de platine soudés au verre, servent d'*électrodes* et sont reliés aux pôles d'une bobine d'induction.

Au-dessous d'une certaine valeur de la différence de potentiel aux électrodes, un gaz raréfié se comporte comme un diélectrique. Pour un voltage convenable, une décharge a lieu, elle est accompagnée de l'illumination du gaz et de phénomènes qui dépendent de la nature du gaz et de sa pression.

807. Tube de Geissler. — Le courant ne passe que sous forme *d'étincelle* tant que la pression de gaz reste supérieure à un centimètre de mercure environ. A une pression plus basse, la décharge *passe beaucoup plus facilement ;* l'intervalle compris entre les électrodes est occupé par une colonne lumineuse dont la coloration dépend de la nature du gaz ; cette lueur est *sensible à l'action d'un aimant,* à la façon d'un conducteur flexible que parcourrait un courant, allant de l'anode à la cathode [1]. Si le tube offre une partie plus étroite, la lueur y devient plus éclatante. La température du gaz lumineux est peu élevée ; on ne voit, au spectroscope, que les raies du gaz, sans que celles des électrodes apparaissent.

A une pression de quelques dixièmes de millimètre de mercure, la colonne présente une *stratification* formée d'une série de disques

(1) La cathode est l'électrode reliée au pôle négatif de la bobine.

minces alternativement brillants et obscurs; la cathode est entourée d'un espace obscur (fig. 988).

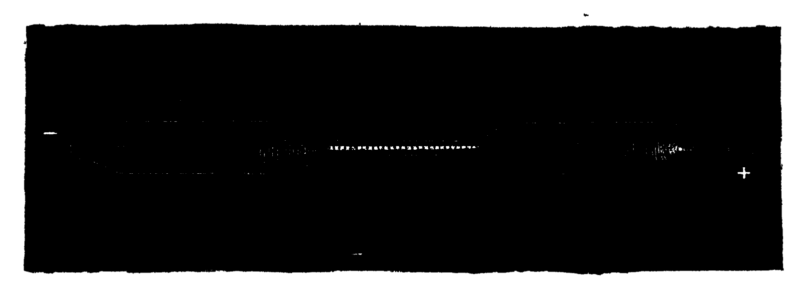


Fig. 988.

808. Tube de Crookes (fig. 989). — Dans un tube de Crookes, la raréfaction est poussée jusqu'à environ un millième de millimètre de mercure. La décharge électrique y *passe plus difficilement* qu'à travers une longueur égale d'air à la pression ordinaire; en outre, l'espace obscur de la cathode s'étend jusqu'à remplir presque tout le tube. Il ne subsiste qu'une faible lueur autour de l'anode.

Lorsque les électrodes d'un tube de Crookes communiquent avec les pôles d'une bobine d'induction, on observe la production de *rayons cathodiques* et de *rayons de Röntgen.*

809. Rayons cathodiques. — Il part de la cathode d'un tube de Crookes, des rayons invisibles qu'on nomme cathodiques.

1° Ces rayons sont *émis normalement* à la surface de la cathode et *se propagent en ligne droite.* Si la cathode est plane, ils forment un faisceau cylindrique. Si la cathode a la forme d'un miroir concave, ils forment un cône qui a pour base le miroir C et pour sommet *o* son centre de courbure. Le faisceau, cylindrique ou conique, produit sur le verre une tache circulaire *ab*. Un corps solide, isolant ou conducteur, arrête les rayons cathodiques, comme un écran, sans les dévier; son ombre se dessine en noir sur les parois du tube. Le trajet des rayons est *indépendant de la position de l'anode* A (fig. 989). Dans un tube de Geissler de

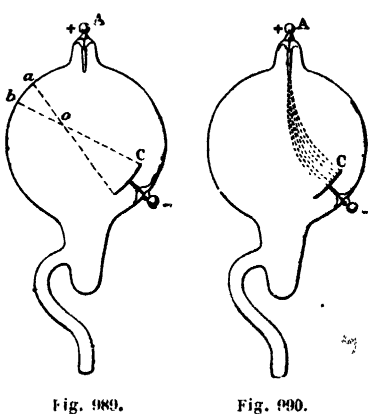


Fig. 989. Fig. 990.

même forme, une lueur se rend de l'anode A à la cathode C (fig. 990).

2° Les rayons cathodiques *provoquent une vive fluorescence* verte en *ab* sur le verre de la paroi opposée du tube. Un grand nombre de substances minérales (diamant, verre, sulfure de zinc, craie) *s'illuminent* brillamment quand elles sont rencontrées par des rayons cathodiques.

3° Un obstacle placé sur le trajet des rayons cathodiques *s'échauffe*, c'est le cas de la paroi *ab* du tube, rendue fluorescente. Une feuille de platine qui serait placée au centre de courbure *o* d'une cathode sphérique (fig. 989) deviendrait incandescente; dans un tube de Röntgen il y a échauffement de l'anode de platine M′ qui forme miroir (fig. 994) au centre de courbure de la cathode.

4° Un aimant *dévie les rayons cathodiques* comme s'ils transportaient de l'électricité et déplace la tache fluorescente qu'ils déterminent sur le verre. Si, devant une cathode plane C à rayonnement cylindrique, on place un écran percé d'une fente *f* qui limite un faisceau à bords nets, ce faisceau rendu visible par une lame de mica MM′, recouverte d'une substance fluorescente, se courbe en *n* par l'action d'un aimant, à la façon d'un courant négatif venant de la cathode (fig. 991).

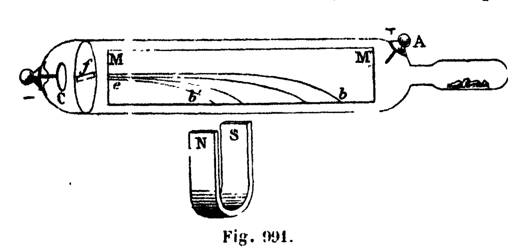


Fig. 991.

5° Les rayons cathodiques *transportent de l'électricité négative par des corpuscules ou électrons*. En passant entre les plateaux d'un condensateur chargé, le *faisceau cathodique est dévié;* il est attiré par le plateau positif et repoussé par le plateau négatif. Si l'on reçoit les rayons cathodiques à l'intérieur d'un cylindre de Faraday relié à un électroscope sensible, l'électroscope accuse une forte charge négative. Bien que la masse des électrons soit insignifiante, leur vitesse leur communique une force vive considérable.

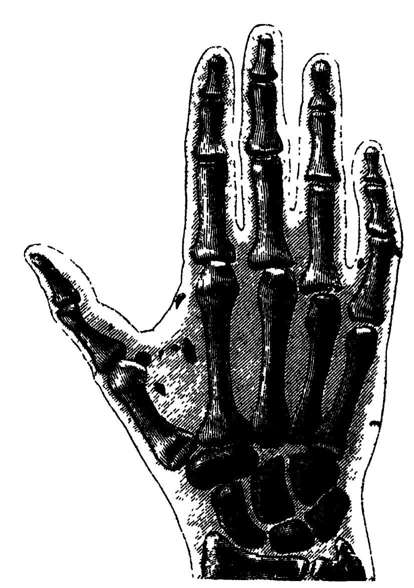
810. Rayons de Röntgen. — En 1895, Röntgen vit qu'un écran recouvert de *platinocyanure de baryum* s'illuminait au voisinage d'un tube de Crookes en activité, enfermé dans une boîte en carton.

Or, la *lumière verte,* dont brille la surface du tube opposée à la cathode, est arrêtée par le carton; l'effet est dû à des rayons *spéciaux* qui sont émis par les parois du verre frappées par les rayons cathodiques, se propagent à l'extérieur, et traversant le

carton. Ces rayons, dits rayons de Röntgen ou rayons X, sont invisibles comme les rayons cathodiques; ils *excitent la fluorescence, impressionnent des plaques photographiques, déchargent les corps électrisés* en rendant conducteurs les gaz interposés. Un aimant ne les dévie pas (différence avec les rayons cathodiques).

Ils ont une *pénétration supérieure* à celle des rayons cathodiques, traversent sans déviation le bois, le diamant; l'aluminium, le verre sont légèrement transparents; le plomb est opaque. La propriété qu'ils ont *de traverser les tissus mous* et d'être *arrêtés par les os,* les a fait appliquer à l'examen **radioscopique**. La fig. 992 est la silhouette


Fig. 992.


Fig. 993.

d'une main d'enfant, éclairée par un tube de Crookes et observée à travers un écran au platino-cyanure de baryum. *Les os donnent une ombre;* les muscles, constituent la pénombre. Toute déformation du squelette devient visible.

Les applications chirurgicales de ce mode d'investigation se comprennent d'elles-mêmes. Sur une main d'adulte (fig. 993), des taches noires, vues sur le métacarpien du médius et sur le métacarpien du petit doigt, ainsi que d'autres taches disséminées dans l'espace interdigital compris entre l'index et le pouce, se rapportent à des fragments de verre qui avaient pénétré dans cette main par suite d'un accident de laboratoire, et qui n'avaient pu être extraits. Un fragment de métal, logé dans les tissus ou incrusté dans les os, apparaîtrait très nettement.

Les silhouettes obtenues sont d'autant plus nettes que la surface d'émission des rayons X est plus petite ; on les produit avec des *tubes focus,* où la cathode est une surface sphérique concave M ; l'anode est une lame de platine M′, inclinée à 45° sur l'axe de la cathode et passant en son centre (fig. 994). Les rayons cathodiques émis normalement par la cathode convergent au centre de la calotte ; il y sont transformés par réflexion en rayons X qui sont renvoyés dans toutes les directions et traversent la paroi de verre.

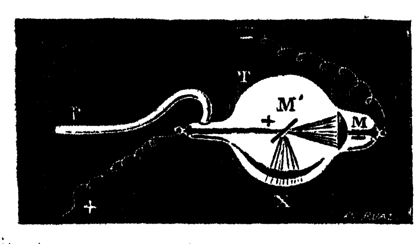


Fig. 994.

Pour faire une *radiographie*, on remplace l'écran de l'*examen radioscopique* par une plaque photographique enveloppée de papier noir qui la protège contre la lumière et qui est perméable aux rayons X (fig. 995). Après un certain temps d'exposition, on développe la plaque dans une chambre obscure. Sur le cliché négatif, l'ombre des os se détache en blanc sur un fond noir.

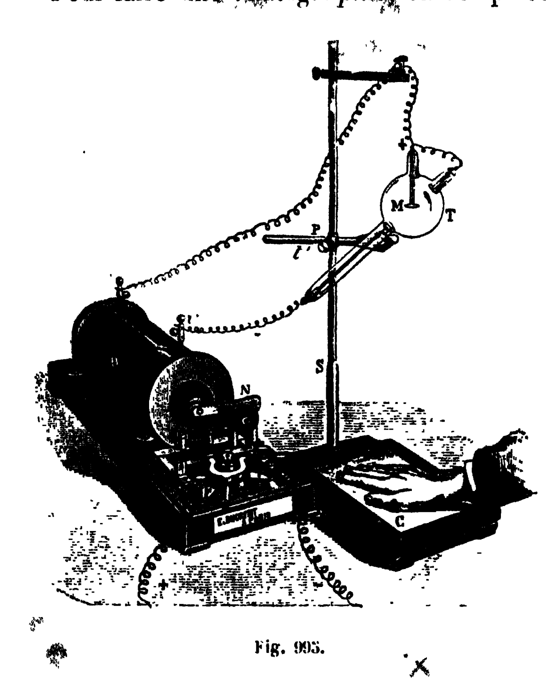


Fig. 995.

Comme les rayons cathodiques, les rayons de Röntgen se propagent constamment en ligne droite, sans se réfléchir ni se réfracter. Ils n'interfèrent pas, ne se diffractent pas, ne se polarisent pas. Toutefois, tandis que les rayons cathodiques sont assimilés à des émissions *matérielles,* les rayons X seraient dus à des **vibrations de l'éther**, beaucoup plus rapides que celles des rayons ultra-violets.

811. Substances radioactives. — Certains métaux, l'*uranium,*

le *thorium* et surtout le **radium**, émettent à la fois des rayons cathodiques et des rayons X, *sans le secours de la source électrique* qui est indispensable pour animer un tube de Crookes.

M. Becquerel a reconnu, en 1896, que l'*uranium* et ses composés émettent, *spontanément* et d'une façon continue, des radiations obscures qui se propagent rectilignement, impressionnent les plaques photographiques, même à travers des substances opaques à la lumière. Ces radiations uraniques ne se réfléchissent pas, ne se réfractent pas, ne se polarisent pas.

M. et Mme Curie ont trouvé d'autres substances qui émettent aussi, d'elles-mêmes, les mêmes radiations, ils les ont appelées *radioactives*.

Ils ont vu que la pechblende, minerai dont on retire l'uranium, renferme une très petite quantité d'un métal incomparablement plus radioactif que l'uranium. Ce métal, appelé *radium*, chimiquement analogue au baryum, est caractérisé par un spectre spécial et un poids atomique élevé. Ses composés, tels que le chlorure et le bromure, jouissent d'une radioactivité surprenante. L'intensité des radiations émises par ces substances dépend de la quantité de matière radioactive qu'elles renferment, quel que soit *d'ailleurs* l'état dans lequel elle s'y trouve.

Les substances radioactives rendent *phosphorescent* le platinocyanure de baryum, impressionnent les *plaques photographiques* à travers des corps opaques, *déchargent les corps électrisés* à travers l'air et les diélectriques; comme les rayons X, elles désorganisent les tissus.

Un corps placé dans le voisinage d'un fragment de sel de radium prend une radioactivité, dite *induite*, qui est temporaire.

Un champ magnétique puissant permet de distinguer dans le rayonnement du radium trois sortes de rayons, appelés α, β, γ.

Les rayons γ possèdent les propriétés des rayons X et ne sont pas déviés par un aimant. Les rayons β sont déviés à droite par un aimant comme les rayons cathodiques et sont constitués par des particules électrisées négativement. Les rayons α sont moins déviés que les rayons β; ils sont déviés à gauche comme des particules électrisées positivement (1).

Tube de Hittorf. — On appelle ainsi un tube à électrodes, comme les tubes de Geissler et de Crookes, mais où le vide a été poussé jusqu'à sa limite extrême. *La décharge ne passe plus.*

ARC VOLTAÏQUE

Étincelle de fermeture. — La différence de potentiel aux deux pôles d'un élément de pile est trop faible (**673**) pour qu'une étin-

(1) M. Gustave Le Bon a donné une théorie de la radioactivité dans son ouvrage sur l'*Évolution de la matière*.

celle éclate quand on rapproche les pôles. Il faut un très grand nombre d'éléments, associés *en série,* pour obtenir *à la fermeture,* une étincelle à travers une mince couche d'air. Avec 1000 éléments Daniell, l'étincelle *de fermeture* est encore à peine visible.

Étincelle de rupture. — Si l'on a fermé le circuit d'une pile, on obtient une étincelle *à la rupture,* même avec un petit nombre d'éléments. Elle est due au *renforcement* notable que produit le courant de self-induction d'ouverture (775).

Lorsque le courant est assez fort pour transporter des particules incandescentes, et que les extrémités des conducteurs sont suffisamment voisines, l'étincelle persiste et produit une lumière *continue.*

812. Arc voltaïque. — La lumière de l'étincelle de rupture est particulièrement brillante avec des *conducteurs de charbon.* Si l'on met en contact deux tiges de charbon, encastrées dans des montures métalliques et communiquant avec les pôles d'une pile de 45 volts au moins (1), les pointes rougissent et on peut les écarter un peu sans que le courant cesse de passer. Les extrémités voisines brillent d'une belle lumière blanche, due à leur incandescence, et entre elles, jaillit un arc violacé (fig. 996), appelé **arc voltaïque.** La flamme de l'arc est un conducteur incandescent formé par les gaz de la combustion et des particules de charbon transportées.

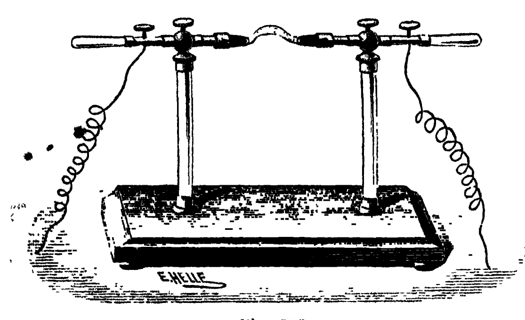


Fig. 996.

Projeté sur un écran, l'arc a beaucoup moins d'éclat que les pointes de charbon. Le *charbon positif,* plus chaud et plus lumineux que le négatif, rougit sur une plus grande longueur.

Dans l'air, les charbons brûlent et **s'usent**. A diamètre égal, le charbon positif *s'use deux fois plus vite* que le négatif et *se creuse en cratère;* le négatif se taille en pointe et bourgeonne (fig. 997).

La résistance de l'arc augmente avec l'écart des charbons; à un certain moment, le courant ne passe plus, l'arc s'éteint; on le réta-

(1) La formation de l'arc exige une *différence de potentiel* dont la valeur dépend surtout de l'écart des charbons.

blit en rapprochant les charbons jusqu'au contact, puis on les écarte de nouveau lentement.


Fig. 997.

Dans le vide, l'usure est moins rapide, mais elle a encore lieu par un *transport de matière* du charbon positif au charbon négatif.

La **température** de l'arc voltaïque atteint 3500°. Elle ne peut être dépassée dans l'arc, car elle est la *température de volatilisation du charbon.* L'accroissement de l'intensité du courant n'augmente que la surface incandescente, sans augmenter l'éclat de la lumière.

Fours électriques. — Le chauffage électrique est plus facile à régler que le chauffage *par combustion.* Dans beaucoup d'appareils usuels à chauffage électrique, comme dans les fours électriques de laboratoire, une spirale de *fil résistant*, peu fusible, enveloppe un vase en terre réfractaire dans lequel se trouve le corps à chauffer. Le tout est entouré d'une enveloppe calorifuge. Mais, même avec des fils de platine, on dépasse difficilement 1200°, aussi la température très élevée de *l'arc voltaïque* est-elle utilisée dans les **fours électriques** (1).

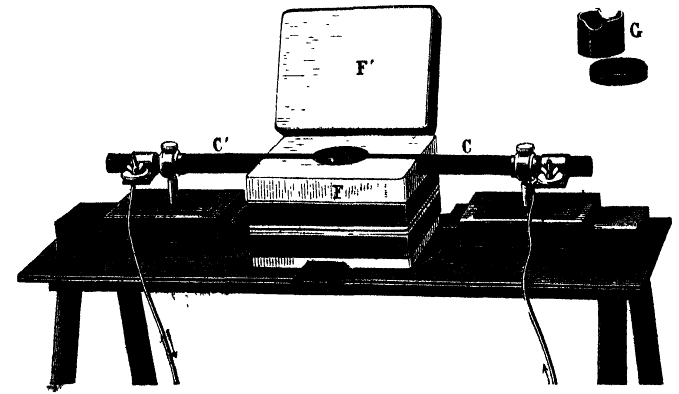


Fig. 998.

Dans le modèle de la fig. 998, la matière soumise à la chaleur de l'arc est placée dans un godet de charbon G sur les bords duquel reposent deux électrodes de charbon horizontales, C et C', entre lesquelles l'arc jaillit. Le godet de charbon et les électrodes sont enfermés dans un

(1) Les fours industriels à chauffage par combustion atteignent difficilement 1600°.

bloc de chaux F. Dans l'arc tous les métaux se volatilisent, la chaux la magnésie sont liquéfiées, les oxydes sont réduits.

Les fours électriques ont l'avantage de concentrer dans un petit espace une grande quantité d'énergie calorifique. Avec une intensité de courant de 1000 ampères, et avec une chute de potentiel de 100 volts entre les électrodes, la puissance est de 100000 watts (plus de 130 chevaux-vapeur). On a construit des fours absorbant 15000 chevaux-vapeur.

Si la chaleur entre seule en jeu, le courant utilisé peut être continu ou alternatif, c'est le cas des fours à *carbure de calcium.*

Si le courant doit décomposer des matières en fusion, le courant doit être continu; cela a lieu pour la préparation de l'aluminium.

La **lumière** de l'arc, riche en rayons très réfrangibles, paraît bleue par rapport à celle du soleil. Au spectroscope, les charbons présentent un spectre continu comme les solides incandescents (**517**). L'arc donne les raies brillantes des vapeurs qu'il renferme.

Lampe à mercure. — Dans un long tube en verre, complètement vide d'air, entre une électrode négative en mercure et une électrode positive en fer, un courant continu fait jaillir un *arc* à vapeur de mercure. Une colonne lumineuse remplit alors tout le tube et son spectre visible présente une bande jaune, une bande verte et une bande violette. La lumière obtenue est privée de rayons rouges et les corps rouges y paraissent noirs. L'arc au mercure fournit de la lumière par *luminescence,* car à la température de la vapeur de mercure de l'arc, l'émission thermique des corps noirs et des corps colorés non luminescents ne comprend pas de rayons visibles. *Son rendement lumineux est élevé,* la dépense est de 0,3 watt par bougie. Par l'absence des fluctuations habituelles aux lampes à arc ordinaires et par sa coloration verte, la lampe à mercure est avantageuse pour la vue. Avec une enveloppe de quartz fondu, l'arc au mercure devient une source précieuse de radiations ultra-violettes contre lesquelles l'œil doit toutefois se protéger.

L'arc au mercure n'est traversé par un courant que lorsque l'électrode mercurielle sert de cathode (1), il se comporte comme une *soupape électrique* et son rendement est réduit de moitié avec un courant alternatif.

ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE



L'énergie électrique est appliquée à l'éclairage sous deux formes :

1° L'*arc voltaïque* qui jaillit quand on écarte l'un de l'autre deux charbons (2) placés dans le circuit d'un fort courant.

---

(1) Une lampe à mercure ne fonctionne qu'après un amorçage préalable qui rend conducteur le milieu gazeux compris entre les deux électrodes.

(2) Les crayons de charbon employés pour la production de l'arc voltaïque sont formés de charbons pulvérisés et agglomérés.

2° L'incandescence *sans combustion* d'un filament conducteur et réfractaire plongé dans le vide.

813. Éclairage par l'arc voltaïque. — Dans l'éclairage par l'arc, *à courant continu*, on prend le charbon positif deux fois plus gros que le négatif et on le met en haut; sa concavité lumineuse envoie ses rayons vers le sol (1). On maintient constante la longueur de l'arc à l'aide de mécanismes appelés *régulateurs*, qui rapprochent automatiquement les charbons d'une quantité égale à leur usure.

Avec des *courants alternatifs*, les charbons sont pris d'égale section, car ils s'usent *également;* ils conservent tous les deux une forme conique. On produisait autrefois l'arc voltaïque avec des éléments Bunsen, en *série*, au nombre de 50 à 100. Actuellement on emploie des accumulateurs et surtout des machines d'induction.

Travail dépensé dans l'arc voltaïque. — Désignons par e la différence de potentiel aux bornes de la lampe, par I l'intensité du courant qui la traverse, le travail dépensé, par seconde, dans l'arc est eI.

Soit $e = 50$ volts, $I = 15$ ampères ; $eI = 750$ watts.

Bougies électriques (fig. 999). — Les bougies électriques permettent de *maintenir* l'arc voltaïque sans mécanisme régulateur.

Une bougie électrique se compose de deux crayons de charbon, *parallèles*, séparés par un mélange isolant. Le courant employé est *alternatif*; il arrive par la borne A, suit le charbon c, enflamme une amorce de pâte de charbon réunissant les pointes de charbon et redescend par c' et B. L'arc jaillit aux extrémités, le mastic isolant disparaît progressivement par la chaleur en même temps que les charbons s'usent; le point lumineux s'abaisse graduellement.

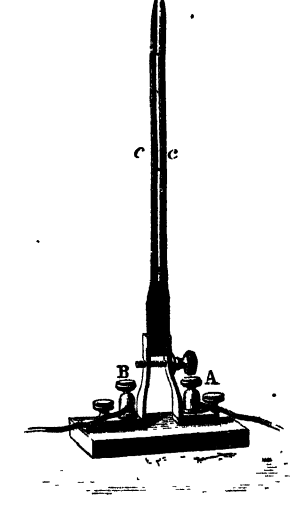


Fig. 999.

814. Éclairage par incandescence. — Le passage d'un courant électrique porte un fil conducteur fin à une température assez élevée pour qu'il devienne lumineux.

(1) Pour les expériences ordinaires de fusion et de volatilisation, le charbon positif est mis en bas et on donne à son extrémité libre la forme d'un creuset.

Lampes à incandescence (fig. 1000) [1]. On a d'abord employé, dans les lampes à incandescence, un *filament de charbon* très mince qui offre une grande résistance au courant. Pour éviter sa combustion, le filament est enfermé dans une ampoule de verre où une pompe à mercure a fait un *vide presque parfait*. Le courant arrive par deux fils de platine aux extrémités du filament.

Les filaments se rompent après un certain temps d'usage; une bonne lampe a une durée moyenne de 1000 heures. Le pouvoir éclairant d'une lampe à incandescence s'évalue en *bougies décimales*.

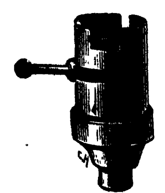


Fig. 1000.

Travail dépensé dans une lampe. — Soit une lampe de 16 bougies à filament de charbon, présentant, en marche, une différence de potentiel de 110 volts aux bornes et traversée par un courant de $0^{amp},55$. Le travail absorbé par cette lampe, en une seconde, est $110 . 0,55 = 60,5$ joules.

L'énergie dépensée est de 3,8 watts par bougie [2].

D'après la relation $e = rI$, la résistance r de la lampe est $\frac{110}{0,55} = 200^{\omega}$.

Association des lampes en dérivation. — Si les lampes étaient placées en série, la rupture d'un seul filament arrêterait le courant et produirait une extinction complète; on évite cet accident en disposant les lampes en dérivation (fig. 1001) entre deux conducteurs AB et CD. Un interrupteur commande le fil de chaque lampe.

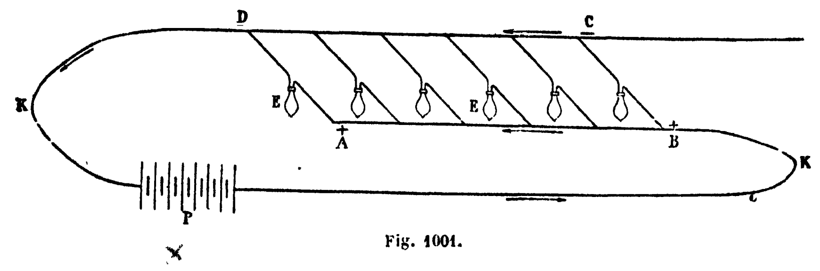


Fig. 1001.

Avec n lampes de résistance r, la résistance de la dérivation est $\frac{r}{n}$.

Appelons I l'intensité du courant principal. E la force électromotrice de la source et R la résistance du circuit extérieur aux lampes :

(1) Les lampes à incandescence ne donnent pas d'émanations qui vicient l'atmosphère et ne dégagent que peu de chaleur. Un joule équivalant à $0^{c}24$ le produit $60,5.0,24 = 14^{c}52$ dégagées par seconde (17 fois moins qu'un bec de gaz de même éclat).

(2) Le *rendement économique* d'une lampe est le nombre de bougies par watt dépensé.

$I = \frac{E}{R + \frac{r}{n}} = \frac{nE}{nR + r}$; le courant de chaque lampe est $\frac{I}{n} = \frac{E}{nR + r}$.

Le travail absorbé par les lampes est $\frac{r}{n} I . I = \frac{r}{n} I^2$.

Les lampes à filament métallique (*tantale, osmium, tungstène*) utilisent un rayonnement de corps colorés (**524**), à émission sélective, et ont un rendement lumineux, plus avantageux que celui du filament de charbon. La dépense devient inférieure à un watt par bougie.

EFFETS PHYSIOLOGIQUES DES COURANTS

Les actions physiologiques des courants électriques sont très complexes ; nous nous bornerons à en citer quelques-unes.

ACTION DES COURANTS CONTINUS

815. Commotions au contact des deux pôles. — Tenant à la main un des pôles, on éprouve une *secousse* si l'on ferme le circuit en touchant l'autre pôle avec l'autre main, surtout si les mains ont été mouillées d'eau salée pour diminuer la résistance de l'épiderme [1]. Tant que le circuit reste fermé, le courant passe dans le corps d'une façon continue sans déterminer de sensation particulière [2]. Une secousse se fait sentir à l'ouverture du circuit.

Les secousses de fermeture et d'ouverture croissent avec le nombre des éléments : une faible pile ne donne qu'un frémissement dans les articulations des doigts ; la commotion est douloureuse avec une pile d'une centaine d'éléments Bunsen ; avec plusieurs centaines d'éléments, elle devient dangereuse. La commotion se produit sans que les éléments aient besoin d'avoir une grande surface ; elle est nette avec une pile à colonne de 50 éléments.

Effets sur les nerfs sensibles et sur les nerfs moteurs. — Quand les deux pôles d'une forte pile sont mis en communication avec deux points du corps, ils affectent les *nerfs de la sensibilité générale* et on éprouve de la *douleur* à la fermeture et à l'ouverture du circuit.

Quand un *nerf moteur* commence à être traversé par un courant,

(1) La résistance opposée par le corps comprend : 1° la résistance des tissus ; 2° la résistance de l'épiderme qui est *extrêmement grande* si la peau est sèche.

(2) Sauf une sensation de brûlure qui dépend de l'intensité du courant et de la nature des électrodes.

le muscle correspondant *se contracte*, par une secousse dite *de fermeture*. La contraction se renouvelle par une secousse *d'ouverture*, au moment où l'on interrompt le circuit.

Avec des fermetures et des ouvertures successives du courant, chaque fermeture et chaque ouverture détermine une excitation du nerf moteur, et une contraction du muscle. Des interruptions suffisamment rapprochées produisent une contraction tétanique.

Les variations *brusques* du courant ont seules un effet mécanique extérieur. Il n'y a pas d'action apparente tant que le courant reste constant ou varie lentement.

Effets sur les nerfs de sensibilité spéciale. — Les effets sur les nerfs spéciaux, optiques, acoustiques, diffèrent des sensations déterminées sur les nerfs de sensibilité générale. Ainsi, dans l'électrisation de la face, l'ouverture et la fermeture du circuit, même avec des courants de quelques milliampères, s'accompagnent d'une lumière qui passe comme un éclair devant la rétine (*phosphène*).

816. Expérience de Galvani. — Les phénomènes de commotion s'observent encore après la mort, tant que dure l'*irritabilité*. Ils persistent assez longtemps chez les animaux à sang froid.

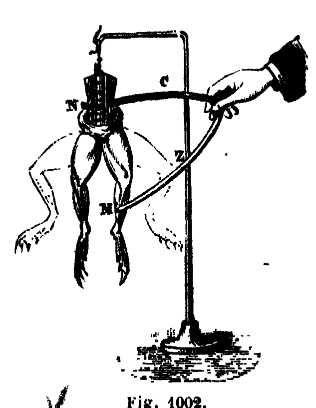


Fig. 1002.

L'expérience se fait avec une grenouille. On coupe en deux, vers la région lombaire, la colonne vertébrale d'une grenouille, on dépouille rapidement la partie inférieure : entre les *deux nerfs lombaires* qui paraissent comme des fils blancs sur les côtés de la colonne vertébrale, on engage un fil de *cuivre* C qui s'attache, d'autre part, à un fil de *zinc* recourbé Z, assez long pour pouvoir toucher les muscles de l'une des jambes (fig. 1002). A chacun de leurs contacts avec le fil de zinc, les jambes se replient et s'agitent. Il en est ainsi à chaque nouveau contact pendant 20 à 30 minutes. Les deux métaux de l'arc métallique forment avec le corps de la grenouille un circuit traversé par un courant; des secousses ont lieu à la fermeture du circuit.

Cette expérience de Galvani fut le point de départ des recherches qui conduisirent Volta à la découverte de la pile.

817. Phénomènes qui accompagnent le passage d'un courant continu. — En pénétrant dans la profondeur des tissus,

un courant continu modifie la circulation, les sécrétions, la température, et la nutrition générale.

Au contact des tampons mouillés (1) qu'on applique pour établir la communication avec la pile, les liquides qui imprègnent la peau sont décomposés par le courant s'il a une certaine intensité. Des bases se déposent à la surface négative, des acides à la surface positive; la peau rougit; à une sensation de picotement succède une *brûlure* douloureuse (2), surtout lorsque les tampons sont remplacés par des plaques métalliques nues.

Les accidents mortels produits par les courants continus de très haute intensité sont probablement dus à des décompositions chimiques dans la masse des tissus.

ACTION DES COURANTS INDUITS

818. — Les nerfs et les muscles soumis à l'action d'un courant qui commence ou qui finit réagissent par une sensation ou une commotion. L'emploi de courants induits qui sont très courts, se succèdent à des intervalles de temps très rapprochés donne lieu à une excitation continue.

Le degré d'excitation d'un nerf dépend de la *force électromotrice maximum* du courant employé. Deux courants induits qui donnent une même impulsion à l'aiguille aimantée d'un galvanomètre parce qu'ils correspondent à la circulation d'une même quantité d'électricité, peuvent agir inégalement. C'est ainsi que, l'excitation due à un courant *induit de rupture* l'emporte notablement sur celle que détermine le courant induit de fermeture du même circuit, qui est moins rapide et n'atteint pas un potentiel aussi élevé.

L'électrisation par des courants induits très rapprochés se nomme *faradisation;* elle se fait en mettant en communication deux points du corps avec les extrémités du fil induit d'une bobine d'induction (à fil secondaire ou à noyau mobile) ou d'une petite machine à courants alternatifs. Avec de très petites bobines d'induction à faibles et courtes étincelles, les commotions n'offrent aucun danger.

Des machines à courants alternatifs de 500 à 1000 volts, de grosses

(1) Plaques de charbon ou de métal recouvertes de peau de chamois imbibée d'eau.

(2) Les effets produits dépendent de la densité du courant aux points d'application des électrodes. Il peut y avoir production d'escarres : à l'électrode négative, où se déposent les alcalis, les escarres sont molles et humides; à l'électrode positive, où se déposent les acides, les escarres sont dures et sèches.

bobines d'induction fonctionnant avec quelques accumulateurs donneraient des secousses foudroyantes. Des conducteurs traversés par des courants alternatifs de haut voltage offrent le danger spécial de ne pas pouvoir être abandonnés à volonté quand ils sont tenus à la main.

Quand on augmente la fréquence, on accroît l'intensité des effets jusqu'à un maximum qui correspond à environ 3 000 périodes par seconde. Au delà de 3 000 périodes, l'action décroît. Vers 10 000 et au dessus, les courants alternatifs sont dits de *haute fréquence*, ils ne donnent plus alors de secousses (**821**).

Les propriétés physiologiques des courants de haute fréquence ont été étudiées et utilisées par M. d'Arsonval.

ONDES ÉLECTRIQUES

On a observé des **vibrations électriques** comparables aux vibrations sonores et aux vibrations lumineuses. Mais, tandis que toute source sonore ou lumineuse est le siège d'un mouvement vibratoire, les courants électriques continus n'ont pas pu être assimilés à des phénomènes vibratoires; des courants alternatifs donnent seuls naissance à des vibrations électriques.

L'étude des vibrations électriques comprend l'exposé des circonstances de *leur production,* l'indication de leurs applications actuelles, en particulier de la *télégraphie sans fil,* enfin la réalisation des phénomènes de la *résonance* et de l'*interférence.*

DÉCHARGE OSCILLANTE D'UN CONDENSATEUR

La décharge d'un condensateur est **continue** ou **oscillante**; cela dépend, d'une part, de la *capacité* des armatures, et, d'autre part, de la *résistance* et de la *self-induction* du circuit de décharge.

819. Décharge continue. — Si le circuit de décharge est suffisamment résistant, le courant de décharge est continu; d'abord nul, il croît jusqu'à un maximum, puis diminue et s'annule.

820. Décharge oscillante. — Lorsque le circuit de la décharge ne comprend que des tiges métalliques de petite résistance, le courant de décharge consiste en courants décroissants qui circulent *alternativement* dans un sens et dans l'autre (fig. 1003). Celle des deux armatures du condensateur qui était primitivement positive devient négative, puis redevient positive et ainsi de suite. Les changements de signe se succèdent à des intervalles de temps *extrême-*

ment courts, de $0^s,0001$ ou beaucoup moins ; la persistance des im-

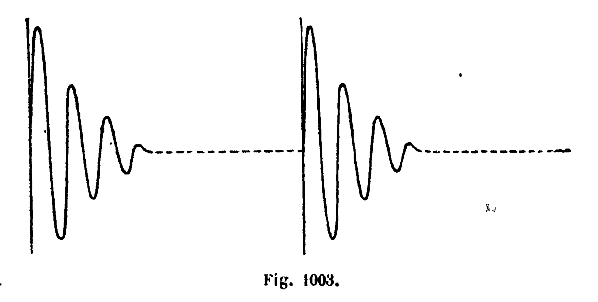


Fig. 1003.

pressions visuelles fait que la succession des étincelles d'une décharge *se fond en une étincelle unique.*

Feddersen a observé le premier en 1860 la décharge oscillante d'une bouteille de Leyde. En face de l'étincelle de décharge E, il plaçait un miroir M (fig. 1004) animé d'un mouvement de rotation assez rapide pour que, pendant la durée de l'étincelle, il ait tourné d'un angle appréciable. Un rayon lumineux E*c*, venu d'une étincelle de décharge, se réfléchit sur le miroir et l'image réfléchie de l'étincelle se fixe sur une plaque photographique P ; elle est étalée si le miroir tourne suffisamment vite. Lorsque la résistance du circuit de décharge est considérable, l'image forme une traînée lumineuse continue. Si la résistance diminue notablement, la bande lumineuse est striée de parties transversales obscures. Cela démontre que la décharge cesse alors périodiquement pour recommencer.

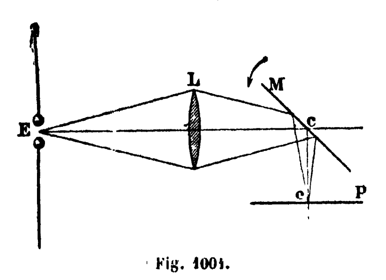


Fig. 1004.

Si la distance de la plaque photographique au miroir est de 1 mètre et si l'étincelle dure un dix millième de seconde, en supposant que le miroir fait 100 tours par seconde, comme l'image se déplace deux fois plus vite que le miroir, la bande lumineuse formée par l'étincelle occupera une longueur $\frac{2\pi.200}{10\,000}$ ou $0^m,125$ (125 millimètres). On voit comment de la largeur de bande on peut déduire la durée de l'étincelle. S'il y a dix vibrations, la durée de l'une d'entre elles est environ un cent millième de seconde.

La décharge oscillante est due à des effets de *self-induction* dans le circuit de décharge (1).

(1) Quand un condensateur se décharge, l'énergie potentielle due à sa charge fait naître un courant dans le circuit de décharge, et en même temps que le courant produit ses effets habituels dans le circuit, il crée *un champ magnétique* d'autant plus accentué que la self-induction est plus grande. Lorsque le courant cesse avec la décharge, le champ magnétique disparaît ; le circuit est alors parcouru, par un courant de sens contraire à celui qui avait

On donne une *image hydraulique* des oscillations électriques, avec deux tubes réunis à leur partie inférieure par un tuyau de caoutchouc, sur lequel presse une pince qui intercepte la communication. L'un des tubes renfermant d'abord seul du liquide, si l'on desserre *brusquement* et complètement la pince, le liquide passe du tube plein dans le tube vide, mais l'égalisation de niveau n'a lieu qu'après quelques *oscillations* d'amplitudes rendues rapidement décroissantes par les frottements du liquide contre le verre. Les oscillations liquides n'ont plus lieu si l'on desserre peu la pince; les surfaces libres viennent lentement dans le même plan, sans oscillation, le liquide s'écoulant sans changement de sens.

La **fréquence** des courants alternatifs d'une décharge de condensateur *est d'autant plus grande que la capacité* C *du condensateur* et *la self-induction* L *du circuit de décharge* sont plus faibles. Cette fréquence est une **haute fréquence** par comparaison avec les courants alternatifs industriels dont le nombre de périodes par seconde ne dépasse guère 50 et qui sont dits de petite ou *basse* fréquence (1).

La *période* ou l'intervalle de temps qui sépare deux instants où l'intensité du courant oscillatoire de décharge passe par zéro en variant dans le même sens a pour valeur $T = 2\pi\sqrt{CL}$ (2). La décroissance des maxima successifs ou *amplitudes* s'appelle *amortissement* (3). Les amplitudes successives de même sens *décroissent en progression géométrique*.

EFFETS D'INDUCTION DES DÉCHARGES OSCILLANTES

821. Comme une décharge oscillante est composée de courants dont *les variations sont extrêmement rapides*, ces courants engendrent des *forces électromotrices induites très élevées* (**783**).

Cette induction a lieu *à travers l'air et à travers les diélectriques*, comme l'induction par approche ou par éloignement des expériences fondamentales de l'induction.

---

créé le champ magnétique et de même énergie, ce nouveau courant recharge le condensateur et lui rend de l'énergie potentielle. Par la répétition des mêmes effets, le phénomène oscillatoire persisterait indéfiniment s'il n'y avait pas de chaleur dégagée dans le circuit de décharge par sa résistance et *amortissement*. Le champ magnétique créé par le courant de décharge en un point P de l'espace est alternatif et oscillant, il a la même période T que les courants alternatifs de la décharge.

(1) En multipliant le nombre des bobines dans le disque induit d'une machine de Siemens, et en accroissant la vitesse de rotation du disque, on peut augmenter notablement la fréquence, en dehors des usages industriels.

(2) Les décharges oscillatoires ont lieu aussi dans les étincelles de bobines d'induction, mais la self-induction étant alors très grande, la période est fort longue.

(3) L'amortissement provient d'une diminution progressive de l'énergie emmagasinée dans l'isolant du condensateur. La dissipation de l'énergie a lieu surtout par un dégagement de chaleur dû à la résistance du milieu dans lequel éclate l'étincelle.

Production des courants induits de haute fréquence. — La disposition suivante (fig. 1005) réalise, à de courts intervalles, la production de courants induits de haute fréquence.

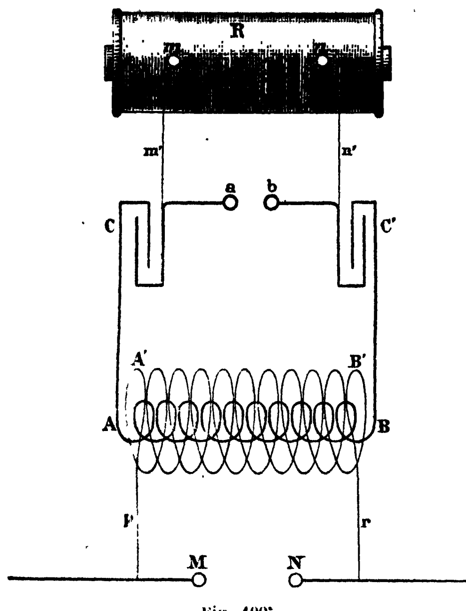


Fig. 1005.

Deux condensateurs C et C', associés en série, communiquent respectivement par leurs armatures internes, d'une part avec les extrémités *m* et *n* du fil secondaire d'une bobine d'induction R et, d'autre part, avec deux boules de décharge *a* et *b*. Leurs armatures externes sont réunies par une *spirale* de cuivre AB, *peu résistante*, qui forme le *fil primaire* d'un transformateur sans noyau. A la rupture du courant primaire de la bobine R, une *décharge* éclate en *ab* et son courant oscillatoire parcourt la spirale AB. Chaque décharge détermine des courants *induits* de haute fréquence *dans le secondaire* A'B' du transformateur. Par ses extrémités *p* et *r*, le fil A'B' aboutit aux conducteurs M et N, d'un *excitateur*.

Propriétés des courants de haute fréquence. — ***Fil induit long et fin.*** — La grandeur de la force électromotrice du fil induit A'B' est due : 1° à la rapidité de la variation des courants oscillatoires de la décharge; 2° au nombre de spires du fil induit dont les différences de potentiel s'ajoutent (1).

On obtient de *longues étincelles* en écartant les boules M et N. En tenant à la main deux conducteurs métalliques (2) que l'on applique sur les deux boules, on ferme le circuit sans ressentir aucune

(1) Les spires du fil secondaire étant portées à des potentiels extrêmement élevés, on plonge les deux fils du transformateur, dans un liquide isolant, tel que l'huile, pour éviter que des aigrettes s'échappent sur toute leur longueur.

Les courants alternatifs de haute fréquence se localisent à la surface des conducteurs qu'ils parcourent à mesure que leur fréquence s'élève. Ils développent en effet, à chaque instant, des courants induits de sens contraires dans les parties profondes.

(2) Les conducteurs préservent les mains de brûlures par contact direct des boules.

secousse. Si l'on remplace les boules par deux disques verticaux parallèles, un tube à gaz raréfié, placé entre les disques, s'illumine.

Fil induit gros et court. — Les courants induits ont une force électromotrice moindre qu'avec un long fil, mais leur intensité est moins réduite. Si la spirale primaire AB du transformateur n'est entourée que par une seule spire formée d'un gros fil de cuivre S et d'une lampe à incandescence E (fig. 1006), la lampe s'allume.

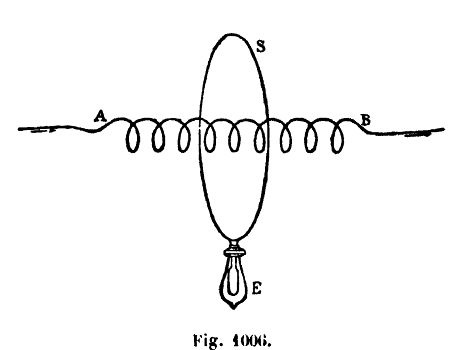


Fig. 1006.

RADIOCONDUCTEURS

Les effets d'induction des courants de haute fréquence étaient limités à de très petites distances, la découverte des *radioconducteurs* a permis de les observer et de les utiliser *à grande distance*.

822. Expériences de M. Branly. — M. Branly a fait connaître, en 1890, une *classe* de corps qui deviennent *à volonté* conducteurs ou isolants. Leur conductibilité s'établit, en particulier, à distance, par l'action d'une étincelle de décharge de condensateur.

Pour montrer cette conductibilité spéciale, on introduit dans un tube de verre V, un peu de **limaille métallique**, sans pression notable; deux pistons métalliques *a* et *b* maintiennent le tube (fig. 1007 et 1008) dans un support et touchent directement les grains de limaille.

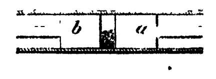


Fig. 1007.

Quand on a intercalé le *tube à limaille v avec un galvanomètre* G dans le *circuit d'un élément de pile* P, le courant de l'élément est sensiblement arrêté par la limaille, sous une faible pression des pistons et le galvanomètre est à peine dévié. Si l'on fait alors *éclater* dans le voisinage, ou même à 50 et 100 mètres, une étincelle d'une machine de Wimshurst munie de son condensateur, ou une étincelle de décharge d'une bouteille de Leyde C (fig. 1004), ou encore une étincelle d'un excitateur à boules de bobine d'induc-

tion, la déviation du galvanomètre, indique que la limaille est devenue *brusquement conductrice* comme si elle avait été brusquement comprimée par les pistons *a* et *b*(1). Cela tient à la production, dans le circuit qui contient le tube, de courants induits alternatifs dus à la décharge oscillatoire de l'étincelle. La conductibilité *persiste* après l'étincelle pendant un temps plus ou moins long. Pour une démonstration, on substitue quelquefois une sonnerie au galvanomètre (fig. 1010). La sonnerie se fait entendre dès qu'une étincelle éclate.

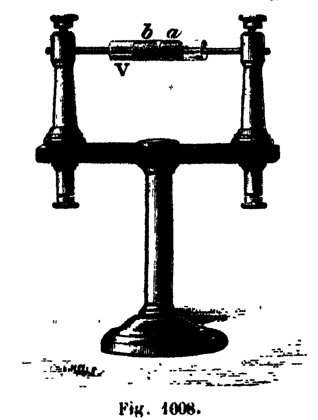


Fig. 1008.

Un choc, parfois très léger, sur le tube rétablit la résistance de la limaille. Une nouvelle étincelle de

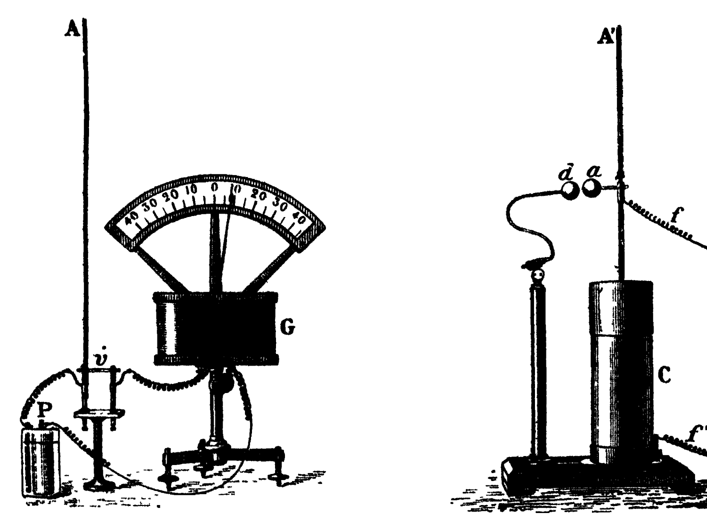


Fig. 1009.

décharge de condensateur rend la conductibilité, un nouveau choc la supprime et ainsi de suite (2).

Variétés de radioconducteurs. — Les substances qui passent ainsi,

(1) Le passage est ouvert au courant de l'élément P et à tout autre, même de force électromotrice beaucoup plus faible.

(2) Les alternatives de conductibilité et de résistance ne se succèdent régulièrement que si un même choc, approprié, correspond constamment à une même étincelle. Un choc trop fort suspend l'action d'une nouvelle étincelle. Le tube offre le maximum de sensibilité lorsque le choc laisse subsister une légère conductibilité résiduelle.

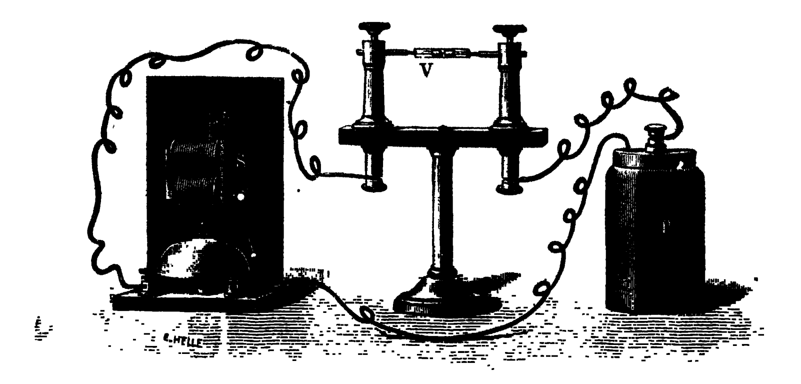


Fig. 1010.

dans les conditions précédentes, de l'état d'isolant à l'état de conducteur, sont des contacts imparfaits, spéciaux, nommés *radioconducteurs*. Ce nom rappelle que leur conductibilité paraît due à un rayonnement électrique qui émane d'une étincelle. Certains radioconducteurs, sont visiblement discontinus comme les limailles (1); d'autres, comme une colonne de billes d'acier, ou comme une tige métallique reposant sur un disque d'acier, n'offrent pas de discontinuité apparente.

Action des milieux. — L'effet se produit à l'air libre, à travers les isolants, et en particulier à travers les cloisons et les murs. Un radioconducteur enfermé avec son circuit *entier* dans une *enveloppe métallique* bien close n'est pas influencé (2). Une couche enveloppante, de quelques centimètres d'eau de mer ou d'une solution saline, exerce la même protection.

Conditions de l'action. — La portée d'action à distance d'une étincelle sur un tube à limaille est augmentée avec l'énergie de la décharge et elle est considérablement *renforcée* quand on met deux **longues tiges métalliques** A et A′ appelées *antennes*, en contact l'une avec l'excitateur et l'autre avec le radioconducteur (fig. 1009).

Le circuit d'un radioconducteur étant soustrait, dans une cage métallique close, à l'effet d'une étincelle extérieure, l'effet d'une nouvelle étincelle à lieu s'il sort de l'enceinte une certaine longueur

(1) La section du tube, le diametre des grains de limaille, leur compression, la force électromotrice de l'élément de pile qui fait partie du circuit du tube, doivent être en rapport avec la conductibilité de la limaille. Quand cette conductibilité est grande, il faut réduire à la fois la compression et la force électromotrice de l'élément de pile. On peut prendre pour limaille un peu de limaille d'or des monnaies, suffisamment fine.

(2) L'enveloppe métallique ne doit pas présenter de *fente*. De petits trous sont sans effet et une cage à mailles serrées exerce la même protection qu'un métal continu.

de fil métallique, isolé de la cage et relié au circuit du radioconducteur.

Usages des radioconducteurs. — Un radioconducteur, intercalé dans un circuit de pile, maintient d'abord le circuit ouvert comme un isolant; il ferme le circuit dès qu'une étincelle éclate. On a ainsi le moyen de *déterminer à distance, sans fil de ligne intermédiaire, à un instant donné,* même à travers des obstacles, les effets du courant : aimantation, éclairage, électrolyse, effets lumineux et, par l'intermédiaire d'électroaimants, les actions les plus variées.

La suppression par un *choc* de la conductibilité d'un radioconducteur permet de rendre son usage *intermittent* comme celui d'un électroaimant. De même que l'aimantation intermittente d'un électroaimant a été utilisée en télégraphie électrique ordinaire, la conductibilité intermittente des radioconducteurs a permis de réaliser la télégraphie sans fil.

TÉLÉGRAPHIE SANS FIL (1)

823. En reproduisant les expériences précédentes de conductibilité intermittente d'un *radioconducteur:* 1° production de la conductibilité à distance par une étincelle de décharge de condensateur; 2° suppression directe de la conductibilité par un frappeur, M. Marconi a étendu graduellement les distances des deux postes (poste de l'étincelle, poste du radioconducteur) et réalisé la transmission de signaux, sans fil de ligne, entre deux stations éloignées.

824. Poste d'émission (fig. 1011). — Un poste d'émission comprend : 1° un excitateur ou *éclateur* E qui fait partie du circuit de décharge d'un condensateur C; entre ses boules *a* et *d* éclate l'étincelle de décharge; 2° une longue tige verticale A, bien isolée, ou *antenne*, partant de l'une des boules *a* de l'éclateur; 3° une *prise de terre conductrice* S, à la seconde boule *d*. Les armatures du condensateur sont chargées par les fils du secondaire d'une bobine d'induction B à interrupteur automatique rapide.

A *chaque interruption* du circuit primaire de la bobine d'induction, une étincelle de décharge du condensateur éclate entre les

(1) La télégraphie par signaux de Chappe, la télégraphie optique sont des télégraphies sans fil. L'idée d'une télégraphie électrique sans fil aurait pu suivre les expériences d'induction de Faraday. En effet, un circuit inducteur agissait *à distance* sur un circuit induit indépendant; il pouvait y développer des effets de courant électrique par le jeu d'un manipulateur ouvrant ou fermant à volonté le circuit inducteur. Mais la distance à laquelle doivent se trouver les deux circuits pour qu'il y ait une action sur les indicateurs habituels du courant est pratiquement insignifiante.

deux boules *a* et *d*. L'étincelle est accompagnée de courants alternatifs de haute fréquence(1) qui parcourent le circuit de décharge et aussi l'antenne d'émission. Ces courants alternatifs font naître, par induction, des courants alternatifs dans tous les conducteurs environnants et, en particulier, dans l'antenne et dans le circuit d'un poste de réception.

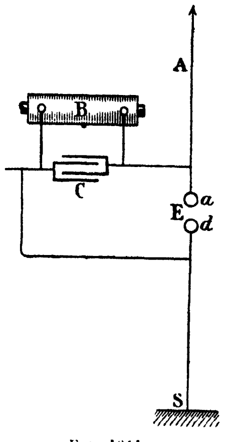


Fig. 1011.

825. Poste de réception (fig. 1012). — Un poste de réception comprend : 1° un ***radioconducteur*** *b*(2) intercalé dans un circuit qui renferme une pile P de faible force électromotrice et un indicateur de courant R; 2° une ***antenne*** A′ annexée à l'une des électrodes *b′* du radioconducteur; 3° une ***prise de terre*** S′ qui part de la seconde électrode b'_1. Avant l'éclatement d'une étincelle d'émission, la résistance du radioconducteur est pratiquement infinie. Quand une étincelle éclate au poste d'émission, la résistance du radioconducteur est assez réduite pour que le courant de la pile soit accusé par l'indicateur du courant. Ce courant est appliqué : 1° à *inscrire un signal;* 2° à *imprimer* un choc ou une *frappe* sur le radioconducteur pour lui rendre sa résistance primitive et le mettre en état d'être impressionné par une nouvelle étincelle. Les deux effets : inscription d'un signal et production d'une frappe se font par l'intermédiaire d'électroaimants. Ils exigent un courant supérieur à celui que permet l'emploi d'un radioconducteur sensible; aussi, dans le circuit **sensible** de la pile et du radioconducteur, on prend pour indicateur de courant *un relais* R qui commande les deux effets dans un circuit **de travail** NN′ (3).

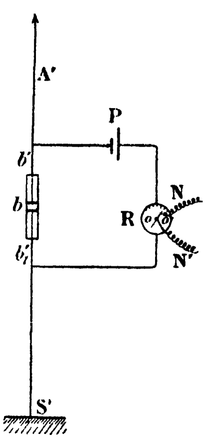


Fig. 1012.

(1) Les fréquences des courants alternatifs de la télégraphie sans fil varient de 50000 à 50 millions.

(2) Le radioconducteur a des formes variées. Si c'est un tube à limaille, une fine limaille est intercalée sur une longueur d'environ un millimètre entre deux pistons qui glissent dans un tube cylindrique de petite section et dont on a réglé par tâtonnements l'écartement.

(3) A l'état de résistance du radioconducteur, le circuit de travail est ouvert par

Lorsque le circuit de travail est fermé par le jeu du relais, le courant d'une pile spéciale à ce circuit se partage entre l'électroaimant d'un frappeur et l'électroaimant d'un appareil inscripteur qui est habituellement l'enregistreur Morse de la télégraphie ordinaire. Une sonnerie d'appel se trouve d'abord dans le circuit de travail; après appel, au moment d'une étincelle d'émission, on lui substitue, au moyen d'un commutateur, l'inscripteur Morse et le frappeur.

Au poste d'émission (fig. 1013), un *manipulateur* M fait partie du circuit primaire de la bobine d'induction; il permet de produire, à

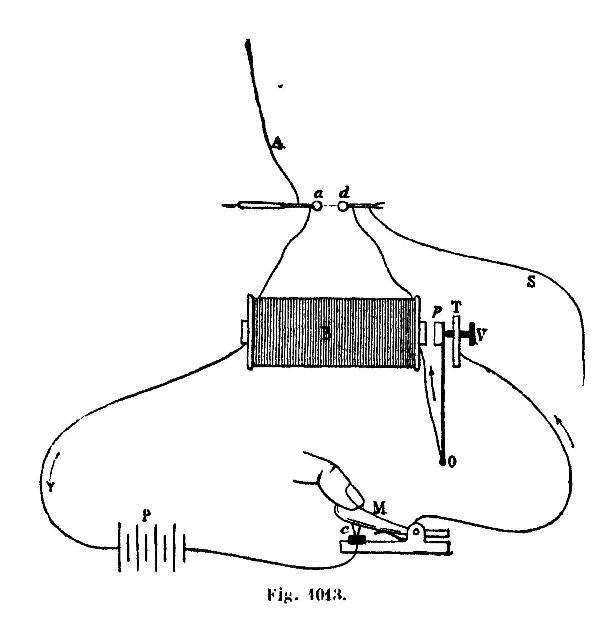


Fig. 1013.

volonté, des fermetures pendant lesquelles le jeu de l'interrupteur de la bobine fait éclater en *ad* un certain nombre d'étincelles de décharge du condensateur (1).

Pendant une fermeture brève du manipulateur, une ou deux étincelles de l'interrupteur automatique éclatent; de là, au poste de

une interruption entre les deux fils N'*o* et N*o*'. A l'état de conductibilité du radioconducteur, à la suite d'une étincelle au poste d'émission, un bras du relais mobile autour d'un axe *o* est venu fermer le circuit de travail par un contact en *o*' (fig. 1012).

(1) Le condensateur consiste, comme à l'ordinaire, en deux surfaces conductrices séparées par une lame isolante (fig. 1011), ou se réduit aux deux branches d'un excitateur. Dans ce dernier cas, pour une même différence de potentiel que précédemment, en raison de la très petite capacité des armatures, l'énergie disséminée par la décharge est faible.

réception un signal court ou *point* formé par une ou deux traces consécutives sur le papier à dépêches, une fermeture plus longue correspond à 4 ou 5 étincelles et par suite à 4 ou 5 traces formant un *trait*. Points et traits se succèdent d'après l'alphabet Morse.

Dans un poste qui doit être, à volonté, d'émission ou de réception, une seule antenne suffit. Terminée à son extrémité inférieure par un bout de câble souple, elle est rattachée, suivant le besoin, au circuit d'émission ou au circuit de réception.

Pendant l'envoi des dépêches, le radioconducteur et son circuit sont protégés contre l'action des étincelles d'émission par une cage métallique qui les enveloppe complètement (1).

826. Récepteur de M. Branly. — La figure 1014 représente un récepteur simple où l'inscripteur et le frappeur sont réunis.

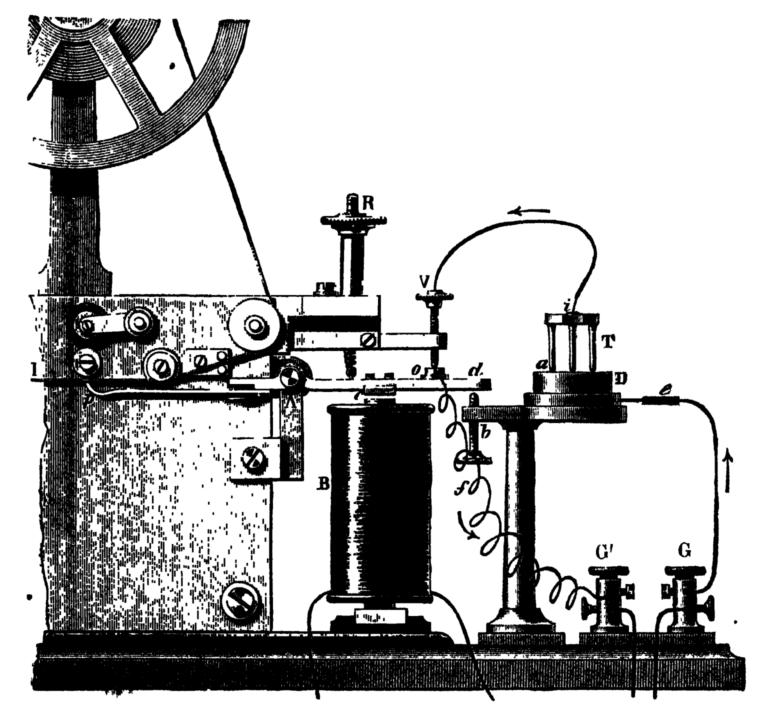


Fig. 1014.

Le radioconducteur employé est un *trépied* T, à pointes *d'acier trempé poli* reposant sur un *disque d'acier* D, concave, également trempé et poli.

(1) L'antenne, isolée de la paroi métallique de la cage, en sort pendant les temps réservés à la réception.

Le courant d'un élément de pile arrive par une borne G, va ensuite au disque D, puis au trépied T par les pointes *a;* de là il se rend à une vis V qui appuie sur une plaquette de platine *o*. Un fil souple *f* le conduit à la borne de sortie G'. Le relais est intercalé avec l'élément de pile du circuit sensible entre les bornes G et G'.

Quand une étincelle brève a éclaté au poste transmetteur, la fermeture du circuit *sensible* s'opère au contact des pointes *a* du trépied et du disque, le relais ferme le circuit de travail. L'électroaimant B du Morse est alors traversé par un courant, il attire le contact *c*, ce qui éloigne la plaquette *o* de la vis *b* et *ouvre le circuit* du radioconducteur. La pointe *p* d'une extrémité de la palette de contact se soulevant quand l'autre extrémité *cd* s'abaisse, une trace est marquée sur le papier à dépêches I.

En s'abaissant, l'extrémité *d* de la palette frappe sur la tête d'une vis *b*, qui sert de butoir et limite la course. Ce choc se transmet au trépied-disque et *supprime sa conductibilité* (pendant l'ouverture de son circuit).

Une nouvelle étincelle brève fait inscrire une nouvelle trace.

En résumé, le circuit *sensible* P*t*BP (fig. 1015) renferme un élément de

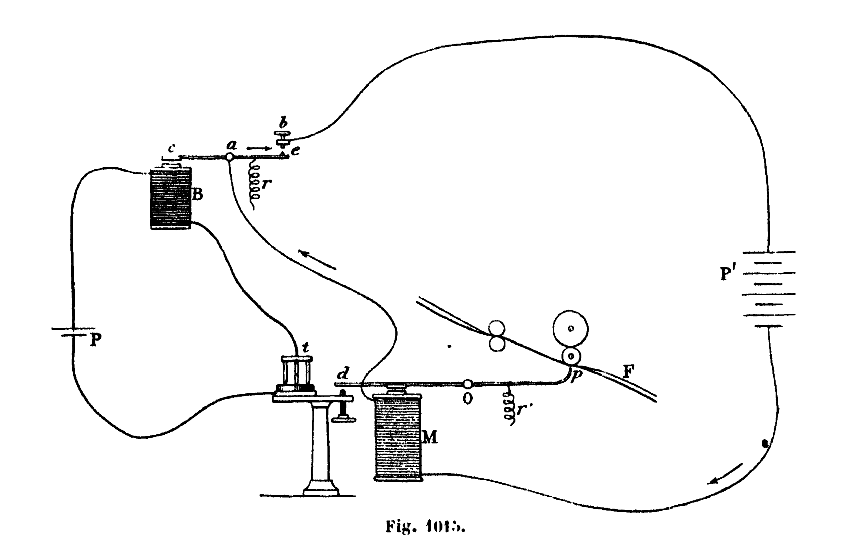


Fig. 1015.

pile P de petite force électromotrice, un radioconducteur *t* et la bobine B d'un relais. Le circuit *de travail* P'M*aeb*P' est fermé en *eb*, par la rotation d'un bras métallique *ae* du relais, au moment où le radioconducteur devient conducteur; il s'ouvre par l'éloignement du contact *c* de la bobine B lorsqu'un choc en *d* a supprimé la conductibilité du radioconducteur *t*. La pile P' fait fonctionner l'électroaimant M de l'inscripteur Morse.

Pour atteindre de grandes portées, on augmente la force des étincelles et la longueur des antennes. L'énergie de la décharge $\frac{1}{2}CV^2$

serait principalement renforcée par l'accroissement de la différence de potentiel des armatures du condensateur ; mais il est plus pratique de faire croître la capacité. La période $T = 2\pi\sqrt{CL}$ des courants de haute fréquence de la décharge augmente en même temps.

Réception par le téléphone. — Si les deux postes sont très éloignés, l'énergie radiante d'une étincelle, dispersée par l'antenne d'émission, n'atteint qu'en proportion extrêmement faible l'antenne et le circuit de réception. La diminution de résistance du radioconducteur devient trop minime pour que le courant qui passe déplace le bras mobile d'un des relais usuels.

En choisissant des radioconducteurs chez lesquels la conductibilité disparaît, *sans choc,* après l'étincelle, on a pu supprimer le circuit de travail. Le circuit sensible subsiste seul; il comprend avec son élément de pile, le radioconducteur et, au lieu du relais, un galvanomètre très sensible à indications extrêmement rapides. Les déviations du galvanomètre sont amplifiées par la méthode de la réflexion et *inscrites* sur un papier *sensible* qui se déroule.

Le plus souvent, on renonce à l'inscription et on remplace le galvanomètre ou le relais par un *téléphone*. Les variations de conductibilité suffisent pour faire entendre au téléphone les points et les traits. La dépêche est alors *lue au son*. Avec certains radioconducteurs, la pile elle-même peut être supprimée (fig. 1021).

827. La télégraphie sans fil en mer. — Depuis dix ans déjà, la télégraphie sans fil rend des services journaliers à la navigation, dans des circonstances où la télégraphie ordinaire est absolument impuissante. Il n'est point de ligne maritime importante qui n'ait sur chacun de ses navires un poste *radiotélégraphique* d'émission et de réception avec des antennes qui s'élèvent le long des mâts. Les voyageurs ne sont plus isolés dans la traversée des océans, ils restent en communication constante avec un continent, soit directement, soit indirectement par des navires en cours de route.

Des signaux lancés, chaque jour, à 11 heures du soir, par la tour Eiffel, donnent instantanément **l'heure** de Paris, à toute distance, en haute mer et permettent aux marins de vérifier le *réglage* de leurs chronomètres pour déterminer la longitude du lieu qu'ils occupent (1).

---

(1) On a facilement la ***longitude*** d'un lieu si l'on détermine simultanément l'heure locale et l'heure d'un méridien d'origine, tels que le méridien de Paris. L'heure du méridien d'origine est donnée par des chronomètres que le navire a emportés.

Les différentes conditions atmosphériques (état hygrométrique, vent, pluie, neige) n'exercent pas d'influence sensible sur les transmissions radiotélégraphiques. Toutefois, la portée des communications est notablement plus grande la nuit que le jour. La courbure de la terre et l'interposition de montagnes entre les postes ne mettent pas d'obstacle à la propagation.

TÉLÉMÉCANIQUE SANS FIL

828. La télégraphie sans fil n'est pas la seule application possible de la conductibilité intermittente des radioconducteurs. La déviation d'un galvanomètre ou l'attraction du contact d'un électroaimant ne sont pas des effets privilégiés. *Tout autre effet* peut être déterminé à distance, à un instant donné, par le jeu d'un radioconducteur, puis suspendu, à volonté, après un temps quelconque. La commande d'effets à distance, sans fil de ligne, constitue la télémécanique sans fil.

Que l'effet commandé soit un effet direct du courant ou un effet quelconque, obtenu par l'intermédiaire d'électroaimants, les conditions qui président à la propagation de l'action d'une étincelle sur un poste récepteur sont les mêmes qu'en télégraphie sans fil.

Tout appareil qui obéit à un courant par fil de ligne est susceptible, quel que soit l'agencement de ses organes, de fonctionner par étincelles, sans modification essentielle dans sa construction. Le passage d'une commande avec fil de ligne à la même commande sans fil n'exige qu'un changement de l'élément propagé entre le poste d'émission et le poste de réception. A un courant propagé suivant des fils de ligne, on substitue la propagation du rayonnement d'une étincelle dans l'espace compris entre les deux postes. Tout se passe comme si ce rayonnement voyageait de l'une à l'autre des antennes des deux postes. Arrivées à l'antenne réceptrice, des vibrations issues des courants alternatifs d'une décharge oscillatoire font naître, à leur tour, des courants alternatifs dans le circuit du radioconducteur. De là, le *déclanchement* qui, dans une commande avec fil, est effectué directement par le courant de la ligne.

Si les circuits relatifs à différents effets sont agencés à l'avance au poste récepteur, *avec leurs sources d'énergie respectives*, chacun étant muni de son radioconducteur, une même étincelle du poste transmetteur ferme tous les circuits et réalise *simultanément* tous les effets. Des appareils spéciaux donnent à un opérateur placé à un poste transmetteur le moyen d'agir sur un poste récepteur où personne n'est nécessaire et de réaliser, soit simultanément, soit *successivement*, les phénomènes qui sont préparés dans différents circuits (1).

(1) On conçoit qu'on peut, par un premier effet, en commander mécaniquement un second, par le second un troisième, et ainsi de suite, de telle sorte qu'une *seule étincelle* d'un poste transmetteur réalise un phénomène complexe à un poste récepteur. La divi-

INTERFÉRENCES ÉLECTRIQUES

829. Expériences de Hertz. — L'observation, par un *miroir tournant*, de l'étincelle d'un condensateur avait démontré *son caractère oscillatoire* et l'*isochronisme* de ses oscillations. En appliquant la *décharge* à la réalisation des *interférences*, Hertz a vérifié sa nature vibratoire et prouvé qu'une vibration électrique est formée, comme une vibration lumineuse, de *deux parties égales symétriques*.

Excitateur de Hertz. — La période des vibrations produites par la décharge d'une bouteille de Leyde ne descend guère au-dessous de $0^{sec},00001$; en *réduisant la capacité* C *et la self-induction* L

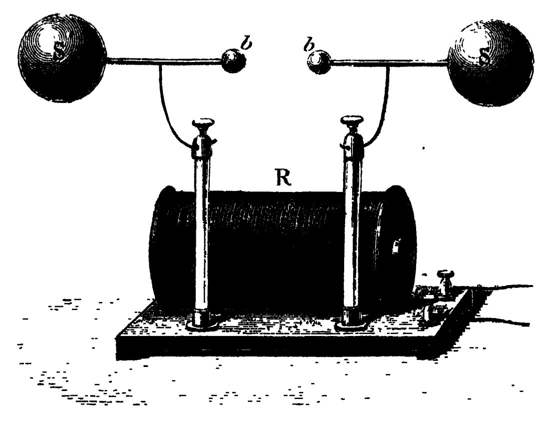


Fig. 1016.

des conducteurs que parcourt la décharge, Hertz a obtenu des périodes dix mille fois plus courtes.

Le rôle du condensateur est rempli par un simple excitateur à boules relié au fil induit d'une bobine d'induction R (fig. 1016).

Toutes les fois qu'un courant induit est produit dans la bobine, les deux armatures *b* du condensateur sont portées à des potentiels de signes contraires. Quand leur différence de potentiel est suffisante, pour la distance des deux boules, une étincelle éclate; elle est accompagnée d'un train d'oscillations électriques (1).

---

sion du travail, c'est-à-dire la production indépendante des divers temps du phénomène par des étincelles successives émises au poste transmetteur offre, dans certains cas, plus de sécurité que leur réalisation *en cascade* par une étincelle unique.

(1) L'excitateur de Hertz se comporte comme un diapason électrique entretenu; tou-

Ces décharges produisent des *phénomènes d'induction très accusés* à cause de l'extrême fréquence de leurs vibrations.

Résonateur de Hertz. — L'organe *fondamental* des expériences de Hertz est son résonateur. C'est un cadre circulaire formé d'un gros fil métallique, interrompu sur un très petit intervalle, entre une petite boule *d* et une vis *e* mobile dans un écrou (fig. 1017). En faisant varier la distance de la pointe à la boule, Hertz a reconnu que *pour un certain rayon du cadre,* à une même distance de l'excitateur, l'étincelle induite était *maximum*. Il a pensé que le cadre offrait le phénomène de la **résonance** (**414**) et qu'il était le siège de vibrations de même période que les vibrations inductrices.

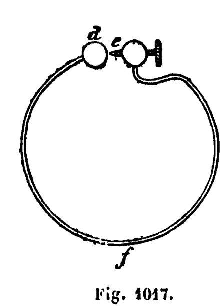


Fig. 1017.

INTERFÉRENCES PAR RÉFLEXION

830. Avec les vibrations électriques, comme avec les vibrations sonores (**430**) et les vibrations lumineuses (**566**), on reproduit le phénomène des interférences par réflexion, en faisant éclater des décharges de condensateur devant un obstacle réfléchissant.

La ligne *bb'* des tiges de l'excitateur étant horizontale, on dispose à une certaine distance, parallèlement à cette ligne, un plan métallique vertical E (fig. 1018). Ce plan, opaque pour les vibrations électriques, les réfléchit. Le mouvement vibratoire *direct* émis par *bb'*, *interfère avec le mouvement réfléchi par le plan,* et l'interférence est constatée avec un résonateur de Hertz accordé.

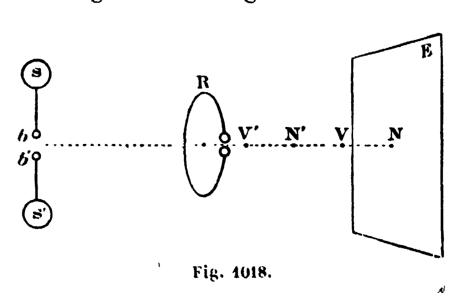


Fig. 1018.

Le long d'une perpendiculaire abaissée du milieu de *bb'* sur la plaque, on déplace le résonateur parallèlement à la plaque, la tangente du cadre au point de l'interruption restant *parallèle* à *bb'*. Les étincelles qui éclatent à l'interruption du résonateur ne di-

---

tefois les vibrations de ce diapason ne se succèdent pas d'une façon ininterrompue, elles forment des groupes ou *trains* comprenant chacun quelques vibrations.

minuent pas d'intensité d'une façon continue quand on éloigne graduellement le résonateur de l'étincelle bb'; *il y a des positions du résonateur* où elles présentent un *maximum d'éclat* et d'autres positions où elles deviennent imperceptibles.

La surface réfléchissante offre un minimum ou un *nœud;* un premier maximum ou *ventre* est reconnu quand le résonateur se trouve à une distance $\frac{\lambda}{4}$ de la plaque, λ étant la longueur d'onde du mouvement vibratoire de l'étincelle bb'; les maxima et les minima se succèdent alternativement.

La *distance* de deux ventres ou *de deux nœuds consécutifs* est $\frac{\lambda}{2}$, moitié de la longueur d'onde de la vibration. De la relation $\lambda = VT$, on déduit la vitesse de propagation V, si T est connu. L'expression théorique $T = 2\pi\sqrt{CL}$, donne T d'après les valeurs de la capacité C et de la self-induction L des branches de l'excitateur; on trouve, pour V, 300000 kilomètres par seconde, valeur de la vitesse de propagation *de la lumière.* Cette concordance indique que la propagation des vibrations doit se faire par *l'éther*, c'est-à-dire par le milieu des vibrations lumineuses.

L'existence de la *polarisation* pour les vibrations électriques prouve qu'elles sont **transversales**, comme les vibrations lumineuses. Les différents phénomènes des vibrations lumineuses sont reproduits avec les vibrations électriques sans qu'il y ait d'autre différence que la **durée de la période**. Les expressions *période, longueur d'onde, surface d'onde,* n'ont pas besoin de nouvelles définitions.

Afin que la valeur de λ fût assez petite pour lui permettre de mesurer, avec son résonateur, la distance de deux nœuds consécutifs, Hertz avait diminué la période. Dans ses expériences, la *longueur d'onde atteignait encore plusieurs mètres.*

En *réduisant les dimensions de l'excitateur,* on est descendu depuis, à des longueurs d'ondes de 4 millimètres. Mais, dans ce cas, la distance à laquelle l'induction est observable se trouve *considérablement diminuée* parce que la quantité d'électricité de la décharge devient très faible. En amenant cette dernière longueur d'onde électrique à $0^{mm},4$, on atteindrait les vibrations *calorifiques* (1) de l'éther. Il n'y aurait plus alors de lacune entre le spectre électrique et le spectre lumineux (**557**).

---

(1) Les propriétés des vibrations calorifiques de grande longueur d'onde se rapprochent beaucoup des propriétés des vibrations électriques.

RÉSONANCE EN TÉLÉGRAPHIE SANS FIL

831. Les vibrations électriques qui accompagnent une étincelle de décharge se propagent, en tous sens, autour du poste d'émission et un récepteur reçoit la dépêche s'il est situé dans le rayon d'action.

La dissémination de signaux autour d'un centre est précieuse, en cas de détresse sur mer ou pour la transmission d'avertissements d'un intérêt général ; mais, il a paru désirable qu'une communication exclusive pût être établie entre deux stations, aussi bien qu'en télégraphie ordinaire, où le courant de la dépêche ne s'écarte pas du fil de ligne. Les propriétés inhérentes à la nature vibratoire du rayonnement électrique ont été pour cela mises à profit.

Les courants qui prennent naissance dans un circuit récepteur, par l'induction due aux courants d'un circuit d'émission, sont d'autant plus accusés que les deux circuits remplissent mieux certaines conditions relatives de formes et de dimensions. Les maxima observés dans les expériences d'interférence de Hertz s'interprètent par une *résonance électrique,* comparable à une résonance acoustique.

La résonance *exige le synchronisme* des mouvements vibratoires des appareils vibrants en présence, et, dans le cas actuel, des courants alternatifs qui circulent dans chacun des deux circuits.

Les conditions à remplir, pour réaliser le synchronisme de deux circuits, résultent de l'expression de la *période* $T = 2\pi\sqrt{CL}$. Cette formule convient aux courants oscillatoires de décharge d'un condensateur dans un circuit d'émission de capacité C, de self-induction L, et de résistance relativement faible. Le produit CL doit avoir la même valeur pour le circuit de réception (1).

D'autre part, l'ébranlement électrique qu'une antenne d'émission disperse autour d'elle est maximum quand la période de vibration qui lui est propre est égale à la période oscillatoire du circuit auquel elle est annexée. On règle cet accord particulier à l'aide d'un curseur dont le contact glisse sur une génératrice d'un solénoïde, qui fait à la fois partie du circuit et de l'antenne. L'antenne comprend alors un fil rectiligne à extrémité libre isolée (fig. 1019) et la partie supérieure du solénoïde (2). Le reste du solénoïde est la partie principale de la self-induction L du circuit

(1) Lorsque cet accord est obtenu, l'intensité efficace du courant oscillatoire induit dans le circuit de réception est *maximum.*

(2) La longueur d'ondulation d'une vibration électrique renforcée par une antenne rectiligne, isolée à son extrémité libre, est égale à 4 fois la longueur de l'antenne. En prolongeant la partie inférieure de l'antenne par quelques spires d'un solénoïde, on accroît considérablement la hauteur de l'antenne rectiligne équivalente.

fermé. Si, dans le circuit, on fait circuler des décharges oscillatoires, il arrive, pour une certaine position du curseur, que la fréquence de leurs courants dans l'antenne est la même que dans le circuit.

Les vibrations de l'antenne de réception devront être synchrones des

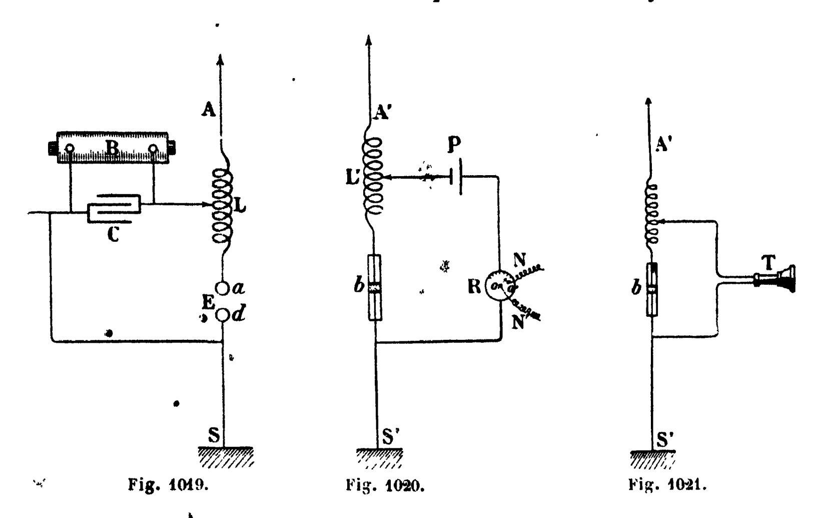


Fig. 1019. Fig. 1020. Fig. 1021.

vibrations de l'antenne d'émission et le circuit de réception devra aussi être accordé avec son antenne (fig. 1020 et 1021).

Avec une résonance parfaite entre deux postes A et B, une dépêche expédiée par A, dont le circuit d'émission vibrerait sur une note électrique déterminée, ne serait reçue que par un poste B accordé. Des vibrations de périodes différentes, envoyées par d'autres postes, seraient, en général, sans action sur B. Par la résonance, pour une même dépense d'énergie dans les décharges et avec les mêmes antennes, la *portée* des signaux est *considérablement accrue*.

Une difficulté dans la réalisation du synchronisme résultait de ce que les oscillations, très rapidement amorties, d'un courant de décharge de condensateur, sont en très petit nombre et de ce que les trains d'oscillations des étincelles successives de l'interrupteur de la bobine ne se suivent qu'à des intervalles relativement longs.

En acoustique, quand un diapason donnant 500 vibrations parle devant un diapason accordé, primitivement au repos, il lui imprime en 20 secondes, 10000 impulsions concordantes consécutives qui produisent la résonance. Son action serait insignifiante s'il n'émettait, pendant ce temps, que quelques trains d'onde très espacés, n'apportant chacun que quelques oscillations. Or, d'après l'analyse par le miroir tournant, une étincelle de l'éclateur d'émission ne donne lieu qu'à un train de 3 ou 4 oscilla-

tions très rapidement décroissantes et les rares trains qui concourent à donner un signal sont séparés par un intervalle qui peut dépasser mille fois la durée de chaque train.

Dans ces circonstances défavorables, la résonance n'est que très imparfaite, *alors même* que les conditions d'accord sont remplies et l'action est, dans une grande mesure, indépendante de cet accord.

Quand une étincelle émet des oscillations très amorties, toute l'énergie rayonnée par la transmission est concentrée en 2 ou 3 oscillations rapidement décroissantes. L'effet produit est *semblable à celui d'un choc*. Il en est de même en acoustique, dans le cas d'une forte détonation de très courte durée. Tous les systèmes vibrants entrent alors en vibration, *mais avec leur période propre*. En définitive, malgré l'établissement théorique de l'accord entre le circuit d'émission et le circuit de réception, l'amortissement étant considérable, le circuit récepteur a longtemps enregistré les signaux de tous les postes puissants et il répondait seulement mieux aux vibrations de même période que les siennes.

On s'est préoccupé d'*améliorer la résonance;* en premier lieu, par l'augmentation du *nombre des oscillations de chaque train* qui correspond à une étincelle et, en second lieu, par un *accroissement* très considérable *du nombre des étincelles* émises par seconde (1).

Il est désirable qu'on arrive à *substituer* aux étincelles d'émission une source de courants alternatifs *ininterrompus*, d'amplitude constante et de fréquence suffisamment élevée.

Synchronisme en télémécanique. — La vulgarisation de la télémécanique sans fil est liée à des nécessités de sécurité qui ont pour elle une importance exceptionnelle, car l'intervention de quelques étincelles étrangères, souvent peu grave à propos de transmissions de signaux, risque de devenir extrêmement périlleuse pour certains effets commandés.

Comme on ne peut pas compter sur la protection absolue d'un synchronisme électrique, M. Branly a fait connaître des dispositifs de sécurité, basés sur un accord mécanique spécial, indépendant de l'accord électrique, qui est d'ailleurs établi. La fermeture du courant de travail n'a lieu qu'en temps opportun; si une étincelle intempestive dévie la pièce du relais qui ferme le contact, le circuit de travail se trouve ouvert.

TÉLÉPHONIE SANS FIL

832. La téléphonie est une variante de la télégraphie. En téléphonie ordinaire, le *microphone* du poste d'émission à fil de ligne remplace le *manipulateur* d'un poste télégraphique, avec cette différence

(1) Avec des *interrupteurs tournants* qui produisent, à la station d'émission, 500 à 1000 décharges par seconde, au lieu d'une cinquantaine, les signaux reçus au téléphone prennent une *note musicale* qui varie avec le poste transmetteur; ils ne sont plus troublés par les bruits grossiers des étincelles atmosphériques accidentelles et, en outre, la sensibilité au téléphone est accrue.

que le microphone ne fait naître que des ondulations d'un courant permanent tandis que le manipulateur détermine des fermetures et des ouvertures complètes.

La voix qui frappe la planchette d'un microphone ne peut être reproduite avec ses *modulations* que si le courant qu'elle modifie est lui-même maintenu; aussi, en téléphonie ordinaire, le courant d'une pile parcourt sans interruption le circuit du microphone. En téléphonie sans fil, le circuit d'émission renferme un microphone et il est parcouru par un courant alternatif de haute fréquence du genre des courants des étincelles de décharge d'un condensateur. Ce courant alternatif devra persister pendant toute la durée d'une conversation. Il y a une antenne au poste d'émission et une antenne parallèle au poste de réception.

Le courant oscillatoire permanent du circuit d'émission est *ondulé* par le tremblement du microphone devant lequel on parle. Ces ondulations parcourent l'antenne d'émission comme le circuit. Par induction à distance, d'antenne à antenne, à travers l'espace qui sépare les deux postes, le courant oscillatoire du circuit d'émission est reproduit, avec sa période, si les deux antennes et les deux circuits sont accordés et les ondulations du courant d'émission font naître des ondulations correspondantes qui passent dans le circuit de réception où se trouve le téléphone. Le circuit récepteur est constitué exactement comme un circuit récepteur *au son* de la télégraphie sans fil. Toutefois, le téléphone récepteur ne fera pas entendre de simples signaux Morse, mais *les paroles* prononcées devant le microphone d'émission.

On est arrivé à obtenir dans le circuit d'émission des oscillations presque continues par un accroissement suffisant de la rapidité de succession des étincelles de décharges, mais la difficulté du maintien d'un courant oscillatoire sera résolue d'une façon toute naturelle lorsque, pour produire les courants alternatifs de haute fréquence et *ininterrompus* dont on a besoin, on pourra faire usage d'alternateurs, à vitesse de rotation suffisamment exagérée.

Dans les conditions actuelles, la *radiotéléphonie* reste bien au-dessous des 6000 kilomètres franchis directement par la radiotélégraphie (1); cependant, avec certains appareils, la portée du transport de la parole a pu atteindre 500 kilomètres.

(1) L'accroissement continu des distances franchies en télégraphie sans fil est dû : au *développement* considérable *des antennes* en hauteur et en surface, à un *synchronisme aussi exact* que possible et à l'audition au téléphone d'*étincelles musicales*.

HISTORIQUE

L'électricité est une science moderne. Jusqu'à ces derniers temps, on a considéré trois groupes de phénomènes électriques : électricité statique, magnétisme et électricité dynamique ; nous avons conservé cette division historique; toutefois, on pourrait adopter actuellement un classement différent : d'une part, l'électricité *du courant* qui engloberait les électricités statique et dynamique et le magnétisme; d'autre part, l'électricité *rayonnante*, de découverte récente.

ÉLECTRICITÉ STATIQUE

Si la connaissance de l'attraction des corps légers par l'ambre frotté remonte à *Thalès de Milet*, au VIe siècle avant l'ère chrétienne, ce n'est qu'au début du XVIIe siècle que l'électricité se développe. A ce moment, l'électricien anglais *Gilbert* donne une liste de corps qui s'électrisent par le frottement; on y rencontre le verre, le soufre; il en exclut les métaux. Il sépare les phénomènes électriques des phénomènes magnétiques.

Otto de Guéricke, bourgmestre de Magdebourg, construit la première machine électrique; elle consistait en un globe de soufre que l'on faisait tourner autour d'un axe et que l'on frottait avec la main. Otto de Guéricke en tire des étincelles et observe la répulsion électrique.

Au commencement du XVIIIe siècle, *Gray*, en Angleterre, distingue les bons et les mauvais conducteurs. Il reconnaît l'influence électrique.

Le physicien français *Du Fay* montre que tous les corps sont susceptibles d'être électrisés, pourvu qu'ils soient isolés; en 1733, il distingue l'électricité positive de l'électricité négative.

Wilke démontre que deux corps frottés l'un contre l'autre prennent des électricités contraires, il construit le premier modèle d'électrophore.

En 1745, *Von Kleist*, doyen du chapitre de Kammin en Poméranie, découvre le condensateur. *Musschenbroek* fait la même découverte à Leyde; l'abbé *Nollet*, à Paris, multiplie, dès lors, les expériences avec les machines électriques et la bouteille de Leyde, et contribue à répandre le goût des études sur l'électricité.

En Amérique, *Franklin* explique le fonctionnement de la bouteille de Leyde, invente le paratonnerre à tige; en Italie, *Volta* construit son électrophore (1775) et l'électroscope condensateur.

A la fin du XVIIIe siècle appartient encore la démonstration par *Coulomb* des lois des attractions et des répulsions électriques.

Au début du XIXe siècle, la pile et ses applications font délaisser quelque temps l'électricité statique. *Faraday* signale toutefois le rôle joué par les diélectriques qui séparent les corps électrisés.

Les mesures calorimétriques de *Riess*, les méthodes électrométriques de *W. Thomson* et de *Gaugain* ouvrent la voie aux recherches précises.

En 1865, *Holtz* fait connaître divers types des machines à influence qui ont remplacé la machine à frottement de Ramsden.

L'introduction de la théorie du potentiel en électrostatique a fait déduire les phénomènes observés de quelques théorèmes généraux, a mis sur la voie d'analogies qui facilitent l'exposé des faits, et elle a conduit à appliquer aux transformations électriques l'*équivalence* qui préside aux transformations de l'énergie.

MAGNÉTISME

Les anciens savaient que l'aimant naturel attire le fer. Vers le XIIe siècle, les navigateurs apprirent à faire usage de la boussole, que les Chinois employaient depuis très longtemps dans leurs voyages sur terre.

A la fin du XVIe siècle, *Gilbert* coordonne et complète les connaissances sur le magnétisme. Il connaît la répulsion des pôles de même nom, l'attraction des pôles de noms contraires; il décrit l'expérience de l'aimant brisé, l'aimantation par l'influence de la Terre et par friction, l'action exercée par un aimant à travers les corps non magnétiques ; il assimile la Terre à un aimant.

En 1780, *Coulomb* établit les lois des attractions et des répulsions entre des pôles magnétiques.

En 1823, *Ampère* assimile les aimants aux solénoïdes. L'aimantation par les courants multiplie les applications des aimants.

Faraday a facilité l'interprétation des phénomènes magnétiques par la considération du flux de force magnétique.

ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE

Il y a un peu plus d'un siècle, la découverte de la pile par *Volta* fut le point de départ de découvertes qui se sont succédé sans interruption.

En 1790, *Galvani*, professeur d'anatomie à Bologne, avait observé les actions que le contact de deux métaux fait naître entre les nerfs et les muscles d'une grenouille; *Volta*, professeur de physique à Pavie, en analysant cette expérience, découvre la pile qu'il décrit en 1800. L'électricité se présente alors sous la forme de *courants continus*. Les effets du courant sont dès lors rapidement signalés.

Phénomènes généraux. — En 1801, *Nicholson* et *Carlisle* décomposent l'eau par la pile. En 1807, *Davy* applique la pile à la préparation du potassium. Avec une pile de 2000 éléments à larges surfaces, il forme un brillant arc voltaïque entre deux pointes de charbon de bois (1810).

Les relations entre l'électricité et le magnétisme ont pour point de départ l'observation faite par *Œrsted*, à Copenhague, en 1819, de la déviation inattendue d'une aiguille aimantée par un courant.

En 1823, *Ampère* développe l'expérience d'Œrsted, il résout par le

calcul et vérifie par l'expérience les différents cas des actions mutuelles des courants. Il observe l'action de la Terre sur les courants et imagine les solénoïdes qui se comportent comme des aimants. Il explique les phénomènes magnétiques en assimilant les aimants à des solénoïdes. Il pose les règles de l'aimantation du fer doux par les courants.

En 1823, *Seebeck* découvre les phénomènes thermoélectriques.

Vers 1827, *Pouillet* et *Ohm* établissent séparément la relation qui existe entre l'intensité du courant d'une pile et la résistance de son circuit. Ohm rattache cette relation aux phénomènes électrostatiques observés le long d'un circuit, phénomènes déjà signalés par Volta et reproduits par Biot.

En 1831, *Faraday* découvre l'induction ou la production de courants électriques à distance sous l'influence d'aimants ou de courants. En 1833, il fait connaître les lois de l'électrolyse.

Applications. — Les années qui ont suivi la découverte de l'induction par Faraday ont été surtout consacrées aux applications des courants.

Les courants constants dus à *Becquerel*, *Daniell*, *Bünsen*, facilitent la vérification des lois des courants (loi d'Ohm, loi de Joule).

Les principes de la galvanoplastie furent posés par *Jacobi* en 1838. A la dorure et à l'argenture se rattachent les noms de *Delarive*, de *Ruolz*.

L'aimantation temporaire du fer doux par les courants conduit à une foule d'appareils : régulateurs, interrupteurs, horloges électriques et surtout télégraphes. La transmission électrique de signaux est réalisée par *Steinheil* à Munich, *Wheatstone* à Londres, *Bréguet* à Paris. L'appareil enregistreur en usage est dû à l'Américain *Morse* (1837).

Le télégraphe fut complété en 1876 par le téléphone du physicien américain *Graham Bell* qui transmet à distance la parole elle-même.

En 1844, *Foucault* rendait pratique la lumière de l'arc voltaïque par l'usage de la pile Bunsen, de baguettes de charbon de cornue et d'un régulateur automatique à électroaimant.

Peu après, la bobine d'induction, établie par *Masson* et *Bréguet*, est rendue plus puissante par *Fizeau* (condensateur) et par *Foucault* (interrupteur à mercure). La bobine sortie des ateliers de *Ruhmkorff* réunit tous les perfectionnements.

Les premières machines d'induction de *Pixii* (1832), à courants alternatifs, n'avaient donné lieu qu'à un petit nombre d'applications.

L'invention en 1871 de la machine de *Gramme*, machine à courants continus obtenus par induction, opère une révolution dans l'industrie électrique. Jusque-là, on avait consommé du zinc pour utiliser les courants de pile. Actuellement, les courants de l'électro-métallurgie et de l'éclairage électrique sont des courants induits, engendrés par des déplacements de circuits dans un champ magnétique, et ces déplacements sont entretenus par des chutes d'eau ou par des machines thermiques qui ne consomment que de la houille. Grâce à l'autoexcitation, les machines d'induction elles-mêmes sont devenues moins volumineuses et moins coûteuses. Le transport de l'énergie, dont la possibilité avait été entrevue dès l'invention de l'électroaimant, est devenu facile par la réversibilité de la machine de Gramme; l'usage des moteurs électriques s'est généralisé.

On avait d'abord utilisé presque exclusivement les courants continus;

actuellement, les courants alternatifs jouent un rôle pratique important en raison de la facilité de leurs transformations.

Les accumulateurs à électrodes de plomb, inventés par *Gaston Planté* en 1860, emmagasinent l'énergie électrique.

Importance en électricité du principe de la conservation de l'énergie. — Le principe de la conservation de l'énergie, précisé par *Thomson* et *Helmholtz*, a conduit à reconnaître les transformations de travail qui accompagnent les phénomènes électriques.

L'électricité apparaît comme un *intermédiaire* qui emmagasine de l'énergie. Cette énergie est restituée sous diverses formes, pendant une décharge ou pendant le passage d'un courant et les lois spéciales du courant électrique permettent de régler à l'avance la forme sous laquelle l'énergie sera restituée et le lieu où on l'utilisera.

Les transformations suivent les règles de l'équivalence avec une rigueur qui rend possible le calcul de la grandeur des effets produits, et l'évaluation de leur prix de revient dans les usages industriels.

RAYONNEMENT ÉLECTRIQUE

Feddersen avait reconnu en 1860 le caractère oscillatoire des décharges de condensateur, et diverses expériences avaient montré la puissance des effets d'induction produits par ces décharges.

Par l'application *directe* des radioconducteurs découverts et étudiés complètement par *Branly* en 1890, l'Italien *Marconi* réalise en 1899 des transmissions de dépêches sans fil. La télémécanique ou la *commande* à distance, sans fils de ligne, des effets du courant ou d'un phénomène quelconque devient possible. La téléphonie sans fil est elle-même réalisée.

Maxwell avait identifié aux ondes lumineuses les ondes électromagnétiques produites dans les décharges de condensateur. Les expériences de *Hertz* sont venues confirmer, en 1889, les vues de Maxwell, elles ont provoqué l'étude complète du rayonnement électrique. Il est maintenant établi que l'éther est agité par des vibrations électriques comme il l'est par des vibrations lumineuses. Ces deux sortes de vibrations se propagent avec la même vitesse, elles donnent lieu aux mêmes phénomènes d'interférences et de polarisation, elles ne diffèrent que par la grandeur de la période.

PROBLÈMES

PESANTEUR

TRAVAIL, ÉNERGIE

1° Quel travail faut-il dépenser à la surface de la Lune pour soulever une masse de 10 kilogrammes à la hauteur de 20 mètres, l'intensité de la pesanteur à la surface de la Lune étant 160?

2° Un bloc de 5 kilogrammes tombe en un lieu où $g = 980$. Quelle sera son énergie cinétique après 4 secondes?

3° Un boulet de 10 kilogrammes est lancé avec une vitesse de 600 mètres par seconde. Quelle est son énergie cinétique?

4° Quelle est la capacité de travail d'une balle de 15 grammes lancée par un fusil de petit calibre avec une vitesse de 650 mètres par seconde?

5° Calculer l'énergie cinétique d'un navire qui déplace 10000 tonneaux et parcourt 20 nœuds à l'heure.

6° Calculer, en kilogrammètres, l'énergie cinétique d'un projectile de 350 kilogrammes, lancé avec une vitesse de 800 mètres.

7° Quel travail a-t-il fallu dépenser pour communiquer une vitesse initiale de 800 mètres par seconde à un projectile de 300 kilogrammes?

8° Calculer l'énergie cinétique d'une masse d'un millième de milligramme qui se meut avec la vitesse de la lumière.

9° Un tramway à vapeur du poids de 10 tonnes transporte 100 voyageurs d'un poids moyen de 65 kilos. Il se meut avec une vitesse de 18 kilomètres à l'heure. Quelle est son énergie cinétique?

10° En un lieu où $g = 980$, une masse de 24 kilogrammes a été soulevée à une hauteur de 8 mètres. Quelle est son énergie potentielle?

11° Calculer la puissance d'une chute d'eau dont le débit est 240 mètres cubes par minute et la vitesse 5 mètres par seconde.

12° Quel est le travail nécessaire pour faire passer un corps de masse égale à 5 kilogrammes, de la vitesse de 10 mètres par seconde à celle de 20 mètres?

13° Quel est le travail produit à Paris par la chute d'une goutte d'eau d'un millimètre 1/4 de diamètre tombant de la hauteur d'un centimètre?

PESANTEUR, CHUTE DES CORPS

14° Soit deux points distants de 1 kilomètre à la surface de la Terre supposée parfaitement sphérique : quel sera l'angle ω des verticales en ces deux points? Le rayon de la Terre sera pris égal à 6000 kilomètres.

15° Quelle est l'accélération communiquée par une force de 50 kilogrammes appliquée horizontalement au centre de gravité d'un corps qui pèse 10 kilogrammes et qui se meut sur un plan parfaitement poli? On prendra $g = 981$.

16° Démontrer que, dans le mouvement de chute d'un corps dans le vide, les espaces parcourus pendant les secondes successives croissent en progression arithmétique.

17° Mouvement d'un corps lancé de bas en haut : Hauteur à laquelle le corps s'arrête. Durée de la descente. Vitesse au bas de la chute.

18° Quel est le temps employé par un corps pour tomber verticalement de 25 mètres en suivant un plan incliné dont l'angle avec l'horizontale est de 30° ?

19° Une pierre met 3 secondes à tomber au fond d'un puits; quelle est la profondeur *e* de ce puits, et quelle est la vitesse *v* de la pierre au bas de sa chute?

20° Les deux masses d'une machine d'Atwood pèsent chacune 20 grammes; on charge l'une avec 1 gramme; quelle sera l'accélération de la chute en un lieu où $g = 981$?

21° Au moyen de la machine d'Atwood on fait agir un poids de 10 grammes, pour entraîner une masse totale de 500 grammes, et on trouve une accélération de 19 centimètres par seconde. Quelle est, en ce lieu, la valeur de *g*?

22° Deux corps tombent d'une même hauteur de 50 mètres à une seconde d'intervalle. Quelle sera leur distance *d* quand le premier touchera le sol?

23° Les deux masses égales dans une expérience faite avec la machine d'Atwood, sont de 100 grammes; quelle doit être la masse additionnelle *x* pour qu'après 4 secondes la vitesse soit de 200 centimètres?

24° De quelle hauteur *h* doit tomber une pierre pour avoir, en arrivant au sol, une vitesse de 100 mètres?

25° Soit un plan incliné dont la hauteur est 10 mètres et dont la ligne de plus grande pente a 50 mètres: calculer l'accélération dans la chute sur le plan incliné. On prendra $g = 981$.

26° Quelles sont les vitesses limites, dans l'air, en chute verticale, pour deux billes sphériques d'un centimètre de diamètre, l'une de densité 10 et l'autre de densité 1? Quelle est la vitesse limite pour une gouttelette de pluie de 10 microns de diamètre?

PENDULE

27° Quelle serait l'intensité de la pesanteur en un lieu où la longueur du pendule qui bat la seconde est 99^{cm}5?

28° Un pendule d'horloge retarde de 24 secondes par jour; de combien faut-il diminuer sa longueur pour qu'il batte la seconde?

29° Une masse de 2 kilogrammes formant la lentille d'un pendule est suspendue à l'extrémité d'une tige de 2 mètres de long : calculer l'énergie de ce pendule, considéré comme un pendule simple, quand la tige fait un angle de 60° avec la verticale, en un lieu où $g = 981$.

30° De combien diminuerait la durée d'oscillation du pendule d'une horloge qui bat la seconde à l'équateur, si on la transportait au pôle?

31° La durée de l'oscillation d'un fléau de balance est de 4 sec., quelle est la longueur du pendule synchrone en un lieu où l'intensité de la pesanteur est 981 ?

ATTRACTION UNIVERSELLE

32° Quelle est l'accélération d'un corps qui tombe à la surface du Soleil? La masse du Soleil est égale à 324431 M (M masse de la Terre), son rayon $R' = 108$ R.

33° Quelle est l'accélération d'un corps qui tombe à la surface de la Lune? $M' = 0{,}01255$ M, $R' = 0{,}273$ R.

34° Quelle serait la durée de l'oscillation d'un pendule de 1 mètre à la surface du Soleil?

35° La masse de la Terre étant $5{,}95.10^{27}$ et son rayon $6.37.10^{8}$, calculer la valeur de la constante G.

36° En admettant pour le coefficient G de l'attraction universelle une valeur

égale à $6{,}7.10^{-8}$ dynes, calculer l'action d'une masse d'un kilogramme sur une autre masse d'un kilogramme à 1 mètre.

37° Par quel nombre faudrait-il multiplier la vitesse de rotation de la Terre pour qu'un corps fût sans poids à l'Equateur? A l'équateur $g = 978$?

38° Avec une vitesse initiale de 800 mètres par sec. et un angle de tir de 15°, quelle serait la portée x d'un projectile, en négligeant la résistance de l'air?

39° Un aéroplane marche horizontalement à une hauteur de 490m 50, avec une vitesse de 80 kilomètres à l'heure. De cet aéroplane se détache une pièce métallique pesant 10 kilogrammes. A quelle distance la pièce atteindra-t-elle le sol, la distance étant comptée à partir de la projection de l'aéroplane au moment où elle se détache?

40° Supposons une masse de 1 kilogramme transportée du pied au sommet de la tour Eiffel; de combien son poids diminuera-t-il? De combien diminuerait ce poids si l'on s'élevait de 10 kilomètres en ballon à Paris?

41° Supposons une masse de 1 kilogramme transportée de l'équateur au pôle, de combien son poids augmentera-t-il sur un dynamomètre gradué en grammes-poids à Paris? Au pôle $g = 983$, à l'équateur $g = 978$.

BALANCE

42° Un corps de masse x est placé dans le plateau A d'une balance, on lui fait équilibre avec p' grammes placés dans le plateau B; on porte le corps x dans le plateau B et on l'équilibre avec p grammes dans le plateau A. Trouver x (méthode de pesée due à Gauss).

43° Dans le plateau A d'une balance on place 100 grammes; l'équilibre s'établit en mettant 100gr005 dans le plateau B. On porte les 100 grammes dans le plateau B; on équilibre par 99gr997 dans le plateau A. Quel est le rapport des bras de levier?

44° Les deux bras du fléau d'une balance sont égaux en longueur, mais le centre de gravité n'est pas sur la verticale du point d'appui du fléau, il en est à une distance d. On pèse un corps en le plaçant successivement dans les deux plateaux et on lui fait équilibre par 24, puis par 26 gr. Quel est le poids vrai?

45° Un dynamomètre est gradué en un lieu où $g = 982$. En un lieu où $g = 980$, il marque pour un corps 8 kilogrammes. Quelle est la masse de ce corps?

46° Quel est l'effort exercé sur le plateau d'une balance en un lieu où l'intensité de la pesanteur est 980 par un corps dont la masse est de 12 grammes?

DENSITÉS

47° Quel est le côté d'un cube de cuivre dont la masse est 1000 grammes, la densité du cuivre étant 8,6?

48° Quel volume occupe à 0° une masse de mercure égale à 1 gramme? La densité du mercure à 0° est 13,6.

49° Calculer la masse de la Terre en prenant 5,5 pour sa densité moyenne, et 6371 kilomètres pour son rayon moyen.

HYDROSTATIQUE

50° Un bloc solide à bases parallèles rectangulaires de 1 mètre carré de surface pèse 200 kilogrammes. Calculer: 1° la poussée qu'il exerce par centimètre carré quand il est posé sur un sol horizontal; 2° la pression qu'il exerce sur le sol, par centimètre carré, s'il forme une table portée par trois pieds qui s'appuient chacun sur le sol par un cercle de 20 centimètres carrés.

51° La surface du petit piston d'une presse hydraulique est de 3 centimètres carrés et celle du large piston de 1 décimètre 8. Quel effort pourra exercer le large piston si l'on applique 4 kilogrammes sur le petit?

52° Pression exercée sur un centimètre carré par une colonne de mercure d'une hauteur de 1 mètre.

53° Un vase plein d'eau ayant la forme d'un cône droit est posé sur un plan horizontal; sa base a une surface de 1 décimetre carré, son volume est un décimètre cube. Quelle est la pression sur sa base ?

54° Un vase cubique, de 20 centimètres de côté, est à moitié rempli de mercure; on achève de le remplir avec de l'eau. Quelle est la pression exercée sur une des faces verticales du cube, la densité du mercure étant 13,6 ?

55° Calculer la pression sur un disque circulaire de 16 centimètres de diamètre plongé dans le mercure, le centre du cercle étant à une distance de 25 centimètres de la surface libre.

56° Un cylindre creux dont la base a une surface de 25 décimètres carrés repose sur un plan horizontal. Sur le couvercle supérieur est assujetti un long tube vertical. Le cylindre est plein d'eau et le tube est lui-même rempli sur une hauteur de 10 mètres Quelle est la pression P qui tend à soulever le couvercle supérieur? Quel est l'accroissement de pression δP qui résulte de l'introduction de 50 grammes d'eau si le tube a une section de 1 centimètre carré ?

57° Deux sphères métalliques, dont les densités sont 5 et 10, ont un même poids P dans le vide. On les suspend aux extrémités d'un levier et on les fait plonger dans l'eau. Quel sera le rapport $\frac{l'}{l}$ des deux bras du levier pour l'équilibre ?

58° Un vase contenant de l'huile et placé sur l'un des plateaux d'une balance (à bras de levier égaux) est équilibré par une tare. On y enfonce un cube de plomb de 5 centimètres de côté tenu à la main à l'aide d'un fil métallique. Quel poids faut-il ajouter sur l'autre plateau pour rétablir l'équilibre? Densité de l'huile : 0,92.

59° Un objet en or, de densité 19,25, pèse 96gr25 ; plongé dans l'eau, il déplace 6 grammes. L'objet est-il creux? quelle est la grandeur de la cavité ?

60° Un corps creux reste en équilibre au milieu de l'eau ; on le plonge dans l'acide sulfurique de densité 1,85; il faut ajouter à l'intérieur du corps creux un poids de 42gr5 pour l'immerger. Trouver son volume v.

61° Une sphère ayant pour densité 0,95 et pour volume 100 centimètres cubes, flotte sur l'eau. On verse de l'huile de densité 0,9 de manière à recouvrir entièrement la sphère. Quel est le volume immergé dans l'eau ?

62° Une couronne massive formée d'or et d'argent et pesant 10 kilos perd 625 grammes dans l'eau. Combien contient-elle d'or ? Densité de l'or 20, densité de l'argent 10.

DÉTERMINATION DES DENSITÉS

63° Un flacon à densité, plein d'eau, pèse 44 grammes. On y introduit 10 grammes de fer en fragments et on enlève l'excès d'eau au-dessus du repère; le flacon pèse alors 52gr7. Quelle est la densité du fer?

64° Un flacon à densité, pèse vide 14gr72, plein d'eau 39gr74 et plein d'une solution saline 44gr85. Quelle est la densité de cette solution?

65° Une barre de cuivre pèse 9000 grammes dans l'air et 7990 dans l'eau. Quelle est la densité du cuivre ?

66° Une sphère de platine pèse 20gr86 dans l'air, 19,86 dans l'eau et 19,36 dans l'acide sulfurique. Quelles sont les densités du platine et de l'acide sulfurique ?

67° Un corps pèse 24 grammes dans l'air, 20 grammes dans l'eau. Quel est son poids apparent dans un liquide de densité 0,75 ?

68° Un solide pèse 2gr25 dans l'air; dans un liquide de densité 1,33, il pèse 1gr50. Calculer la densité du solide.

69° Un aéromètre de Fahrenheit pèse 50 grammes; il faut le charger de 10 grammes pour le faire affleurer dans un liquide de densité 0,75. Quel poids x faut-il placer sur la coupe pour le faire affleurer dans l'eau pure ?

70° Un pèse-esprits de Baumé marque 0 dans l'eau, 25 dans l'alcool de densité 0,8. Quelle est la densité d d'un liquide où l'aréomètre marque 40 ?

71° La densité de l'acide sulfurique du commerce est 1,84 ; il marque 66 au

pèse-acides de Baumé. Quelle est la densité x de l'eau salée qui a servi à marquer le point 15 ?

72° Un litre de liquide de densité 1,56 est mélangé avec trois litres de densité 0,8. Le liquide présente une contraction de $\frac{1}{10}$. Quelle est sa densité d ?

73° Un morceau de liège pesant 19 grammes est lié à un barreau d'argent de 63 grammes. L'ensemble se maintient en équilibre au milieu de l'eau. La densité de l'argent est 10,5. Quelle est la densité d' du liège ?

74° On verse de l'eau jusqu'au milieu de la hauteur dans un tube en U dont les branches égales ont une longueur de 42 centimètres. On remplit ensuite l'une des branches d'huile de densité 0,8. Quelle hauteur occupera cette huile?

75° L'acide sulfurique qui remplit un flacon à densité jusqu'au trait de repère pèse 1533 grammes; l'eau qui occupe le même volume dans le flacon pèse 830 grammes. Quelle est la densité de l'acide sulfurique?

76° Un fragment d'un sel insoluble dans l'essence de térébenthine pèse 0gr352; dans un flacon à densité, il déplace 0gr13 d'essence de térébenthine. La densité de l'essence étant 0,872, quelle est la densité du sel?

PRESSION ATMOSPHÉRIQUE

77° Calculer la pression exercée par l'atmosphère sur une surface de 1 centimètre carré, lorsque la hauteur barométrique est 75 centimètres, en un lieu où l'accélération est 980,68. Densité du mercure : 13,596.

78° Quelle est la pression supportée par la membrane d'un crève-vessie de 4 centimètres de rayon, lorsque le vide a été fait à 2 centimètres? Hauteur barométrique 76.

79° Quelle est la hauteur x de la colonne d'air qui, à 0° et à la pression 76, exerce la même pression qu'une colonne de 1 centimètre de mercure? La densité de l'air à 0° et à la pression 76 est 0,001293.

80° Quelle serait la hauteur de l'atmosphère en un lieu où le baromètre marque 76, si l'air avait une densité constante et si g ne variait pas avec l'altitude ?

81° La hauteur barométrique est 76 au bas de la tour Eiffel; quelle sera-t-elle au sommet, à la hauteur de 300 mètres? Densité de l'air, 0,0013.

82° La hauteur barométrique étant 76 centimètres, quelle est la pression exercée par l'atmosphère sur la surface du corps humain qu'on supposera exprimée en mètres carrés par 1,8 ?

83° Quelle est la densité d'une huile qui s'élève dans un tube barométrique a une hauteur de 11 mètres 68, lorsqu'un baromètre à mercure voisin marque 76?

84° Le diamètre d'un tube barométrique est de 2 centimètres, la cuvette est circulaire, son diamètre est de 4 centimètres. De quelle hauteur x s'élèvera le niveau dans la cuvette lorsque le baromètre baissera de 5 millimètres?

85° Dans des hémisphères de Magdebourg de 5 centimètres de rayon, on a fait le vide jusqu'à 1 centimètre. On a fixé au sol l'hémisphère inférieur: quel effort de traction faut-il exercer pour séparer l'hémisphère supérieur, la pression extérieure étant 76 centimètres?

86° Quelle doit être la capacité d'un vase contenant 3 grammes d'air à 0°, pour que cet air exerce une pression de 500 grammes par centimètre carré? Densité de l'air : 0,0013.

COMPRESSIBILITÉ DES GAZ

87° Une masse de gaz, mesurée à la pression de 74 centimètres, occupe un volume de 646 centimètres cubes. Quel est son volume à la pression 76?

88° Un litre d'air pèse 1gr293 à la pression 76; quel est le poids d'un litre d'air a la pression 77 ?

89° Une même masse d'air occupe successivement deux sphères de 2 et de 5 centimètres de rayon. Quel est le rapport des pressions?

90° Un tube barométrique de 1 centimètre carré de section et dans lequel le mercure s'élève à 76 centimètres, présente une chambre vide de 10 centimètres

de longueur. Quel volume V d'air faut-il introduire à la pression de 76 centimètres pour que le niveau tombe à 50 centimètres ?

91° Un tube barométrique de 1 centimètre carré de section marque 77 centimètres, et la hauteur de la chambre barométrique est de 4 centimètres. De combien le mercure sera-t-il déprimé si un centimètre cube d'air (à la pression 77) passe dans le tube ?

92° Une petite bulle d'air, adhérente à la paroi d'un vase qui contient de l'eau, a un volume de $\frac{1}{50}$ de centimètre cube ; elle est située à $6^m,8$ de profondeur, au-dessous de la surface libre. Quel volume prendra-t-elle si la pression extérieure passe de 77 à 74 centimètres de mercure ?

93° Un tube barométrique contient un peu d'air. La chambre barométrique ayant 10 centimètres de hauteur, la colonne observée est de 75 centimètres. On soulève le tube ; lorsque la chambre barométrique occupe 15 centimètres, la colonne a 75,2 centimètres. Calculer la hauteur barométrique vraie H au moment de l'expérience.

94° La chambre d'un baromètre à siphon, longue de 10 centimetres, contient un peu d'air. la hauteur observée est 75, on enlève du mercure avec une pipette, la différence des niveaux devient 75,2 et la longueur de la chambre barométrique 10,8. Quelle est la valeur H de la pression atmosphérique ?

95° Une cloche à plongeur cylindrique, ayant une hauteur de 3 mètres et une section de 6 mètres carrés est descendue dans l'eau jusqu'à ce que son sommet se trouve à 10^m6 au-dessous de la surface. Quel volume V d'air faudra-t-il introduire à la pression extérieure qui est de 76 centimètres pour empêcher l'eau de s'élever dans la cloche ?

96° Une éprouvette cylindrique contenant un gaz plonge dans une cuve à mercure. Le gaz occupe une hauteur de 10 centimètres, le mercure est soulevé de 15 centimètres ; il faut enfoncer l'éprouvette de 17 centimètres dans la cuve pour que le gaz ait une pression égale à la pression extérieure. Quelle est la pression atmosphérique H ?

MANOMÈTRES. MÉLANGE DES GAZ

97° Dans un manomètre à air libre qui communique avec un récipient à air comprimé, le mercure s'élève à 570^{mm} au-dessus du niveau de la cuvette (de niveau sensiblement invariable) ; la hauteur barométrique est 750 millimètres. Quelle est la force élastique de l'air comprimé ?

98° La hauteur du tube d'un manomètre à air comprimé est de 67,7 centimètres au-dessus du point où s'arrête le mercure, à égalité de niveau dans le tube et dans la cuvette pour une pression de 76 centimètres (cuvette à niveau sensiblement invariable). Pour quelle pression H le mercure s'élèvera-t-il à 35,2 centimètres ?

99° Un manomètre à air comprimé, cylindrique et contenant de l'air sec, plonge dans une large cuvette à mercure, de niveau invariable. La hauteur du tube est 40 centimètres au-dessus du point où s'arrête le mercure à égalité de niveau dans le tube et la cuvette, pour une pression de 76 centimètres. A quelle distance d du sommet du tube s'arrêtera le mercure pour une pression de 3 atmosphères ?

100° Un manomètre à air comprimé est formé de deux branches cylindriques de même diamètre : le mercure est de niveau dans les deux branches quand la branche ouverte reçoit une pression de 76 centimetres ; la hauteur du tube fermé occupée à ce moment par l'air est de 40 centimètres. A quelle distance d du sommet se trouvera le mercure pour une pression de 3 atmosphères ?

101° Un premier ballon contient 6 litres d'oxygène sous la pression de 4 atmosphères ; un deuxième ballon renferme 4 litres d'azote sous la pression de 5 atmosphères. On les fait communiquer. Quelle est la force élastique F du mélange, lorsque la température est redevenue égale à la température initiale ?

102° Dans le problème précédent, quelle est la composition centésimale du mélange en volumes ?

103° Un récipient renferme 5 litres d'air à la pression de 1 mètre de mercure, on fait sortir une masse d'air qui occupe 2 litres à la pression de 76 centimètres. Quelle est la force élastique du gaz resté dans le récipient?

104° Un ballon de 10 litres, plein d'air à la pression atmosphérique 76, pèse 215 grammes; plein d'air comprimé à 3 atmosphères, il pèse 241 grammes. Quelle est la densité D de l'air à la pression 76?

CORPS PLONGÉS DANS L'AIR

105° Un lingot de platine, de densité 22, est équilibré dans l'air (à 0° et sous la pression 76) par un poids de laiton de 100 grammes. Quelle est la masse du lingot de platine dans le vide? Densité du laiton : 8,4.

106° Un lingot de métal fait équilibre dans l'air à un poids de 50 grammes de laiton. Plongé dans l'eau à 0°, dont la densité est 0,99987, il fait équilibre à 42 grammes de laiton. Quelle est la densité du lingot?

107° Quelle est la force ascensionnelle d'un cylindre de bois, plongé dans l'eau, de 20 centimètres de hauteur et de 10 centimètres de diamètre? La densité du bois est 0,6.

108° Le volume d'un aérostat gonflé au gaz d'éclairage est 1000 mètres cubes et sa masse totale, y compris la nacelle, est de 500 kilogrammes. Quelle masse le ballon peut-il soutenir? Densité de l'air : 0,0013; densité du gaz : 0,0005.

109° Quel est le plus petit rayon que puisse avoir un aérostat sphérique gonflé d'hydrogène pour lui permettre d'enlever son enveloppe? Le poids du mètre carré de l'enveloppe est 250 grammes. Densité de l'air : 0,001293; densité de l'hydrogène : 0,001293.0,069.

110° Quel rayon faudrait-il donner à une enveloppe sphérique d'aluminium d'une épaisseur de 3 millimètres et parfaitement vide, pour qu'elle pût se soutenir dans l'air à 0° sous la pression 76? La densité de l'aluminium à 0° est 2,6; la densité de l'air à 0° et 76 est 0,001293.

VIDE ET COMPRESSION

111° Le récipient d'une machine pneumatique a une capacité de 4 litres, et la pression de l'air y est de 76 centimètres. Le corps de pompe ayant une capacité de 1/2 litre, quelle sera la pression dans le récipient après 4 coups de piston?

112° Quel est le rapport des capacités du récipient et du corps de pompe d'une machine pneumatique si, à la fin du quatrième coup de piston, la densité du gaz du récipient est devenue les $\frac{81}{256}$ de la densité primitive?

113° Le manomètre d'une machine pneumatique marque 5 centimètres après 10 coups de piston; la pression primitive du récipient était 75. Que marquera le manomètre après 20 coups de piston?

114° On place un corps sous la cloche d'une machine pneumatique. La pression initiale est 76 cm., elle devient 19 après 2 coups de piston. quel est le volume v du corps? Volume de la cloche : 2 litres; volume du corps de pompe : 1 litre.

115° Le récipient d'une machine pneumatique a une capacité de 3^l79, et le corps de pompe de 0^l58. Après combien de coups de piston la densité de l'air sera-t-elle réduite à $\frac{1}{10}$ de sa valeur primitive?

116° La capacité du corps de pompe d'une pompe de compression est de 80 centimètres cubes; dans le récipient dont la capacité est de 1 litre, la pression initiale est égale à 1 atmosphère. Combien faudra-t-il de coups de piston pour amener la pression de l'air du récipient à 5 atmosphères?

117° Le volume du récipient d'une pompe de compression étant 10 fois celui du corps de pompe, après combien de coups de piston la pression de l'air du récipient sera-t-elle double de la pression extérieure?

SIPHON, POMPES

118° Quelle est la plus grande hauteur h à laquelle un liquide de densité 1,5 pourra être porté par un siphon quand le mercure se tient à 76 centimètres? Poids spécifique du mercure : 13,6.

119° Le tuyau d'aspiration d'une pompe a 4 mètres de haut et 3 centimètres carrés de section; la section du corps de pompe est égale à 200 centimètres carrés. Quelle doit être la hauteur h du corps de pompe pour que, au premier coup de piston, l'eau s'élève au sommet du tuyau d'aspiration? Pression extérieure 75.

120° Le corps de pompe d'une pompe aspirante a une longueur de 40 centimètres, sa base inférieure est à 6 mètres de la surface du réservoir, la section du tuyau est $\frac{1}{5}$ de celle de la section S du corps de pompe. Quelle sera la hauteur de l'eau dans le tuyau après qu'on aura soulevé le piston? Hauteur barométrique 76.

121° Une pipette cylindrique de 25 centimètres de hauteur est plongée de 20 centimètres dans le mercure. On la ferme avec le doigt à sa partie supérieure et on la sort du mercure. Quelle hauteur occupe le liquide qui reste quand l'écoulement s'arrête? Hauteur barométrique 75.

122° Le large piston d'une presse hydraulique a un rayon de 5 centimètres; quel doit être le rayon du piston de la pompe pour qu'un effort de 20 kilogrammes exercé sur le long bras du levier transmette une pression de 2000 kilogrammes? Le rapport des bras du levier de la pompe est 4.

CHALEUR

TEMPÉRATURES ET DILATATIONS

1° A quelle température les thermomètres Fahrenheit et centigrade marquent-ils le même degré?

2° Dans l'échelle de Delisle, on marquait 0° au point d'ébullition de l'eau et 150° à la glace fondante. Convertir 50° Delisle en degrés centigrades.

3° Réduire à 0° une hauteur barométrique égale à 75,5 à 15°.

4° Quelle variation de longueur éprouve en passant de 0° à 40° une longueur de rails en fer ayant 1000 mètres à zéro? Coefficient de dilatation du fer, 0,000012.

5° On lit un intervalle de 87,2 centimètres à 28° entre deux points sur une échelle de laiton graduée à 0°. Coefficient de dilatation du laiton, 0,000019. Quelle est la vraie distance?

6° Deux barres de laiton et de fer sont juxtaposées et fixées invariablement à une de leurs extrémités. On les place dans la glace, et on marque un trait perpendiculaire à la longueur à la fois sur les deux barres et à une distance de 1 mètre de l'extrémité fixée. On chauffe l'ensemble à 100° : le laiton se dilate davantage, et les traits s'écartent de 0mm74. Le coefficient de dilatation du fer étant 0,0000118, quel est le coefficient λ de dilatation du laiton?

7° Une sphère de fer de 5,01 centimètres de diamètre à 0° s'appuie sur un anneau de zinc de 5 centimètres de diamètre. A quelle température t la sphère passera-t-elle?

8° Dans un four dont on veut la température, on place une barre de métal ayant 1m10 à 0°. La longueur de la barre devient 1m107. Le coefficient de dilatation du métal est 0,000012. Quelle est la température t du four?

9° La densité de l'argent est 10,31 à 0°. Son coefficient de dilatation cubique est 0,000058. Trouver sa densité à 150°.

10° La densité du mercure est 13,6 à 0° : quelle est-elle à 20°?

11° Un tube cylindrique en verre de 1 m. de longueur à 0° et 2 cm. de diamè-

tre est rempli de mercure sur une longueur de $0^{m}95$. A quelle température sera-t-il entièrement plein? Coefficient de dilatation cubique du verre : $\frac{1}{38700}$.

12° Étant donné un vase en verre, y introduire un volume de mercure à 0° tel que la portion de capacité qui restera libre demeure la même à t^0 qu'à 0°. Coef. de dil. du mercure : $\frac{1}{5550}$; coef. de dil. cubique du verre : $\frac{1}{38700}$.

13° Un tube capillaire a $\frac{1}{5}$ de mm. de diamètre; quel est le volume V_0 du réservoir qu'il faut lui souder pour avoir un thermomètre dont le degré ait 1 cm. de longueur? Coef. de dil. du mercure $\frac{1}{5550}$; coef. de dil. du verre $\frac{1}{38700}$.

14° Le tube d'un thermomètre a $\frac{1}{10}$ de millimètre de diamètre: le réservoir est cylindrique et a 1 centimètre de haut sur 2 millimètres de rayon. Quelle est la longueur du degré?

15° Un thermomètre centigrade est plongé jusqu'au degré 25 dans un bain liquide; le mercure s'élève jusqu'au degré 110. Quel degré marquerait ce thermomètre s'il était plongé dans le liquide chaud jusqu'au niveau où s'arrête le mercure? La température extérieure est 15°.

16° Un thermomètre à mercure entièrement plongé dans un liquide de température uniforme marque 95°. Quelle température marquerait-il si l'on plongeait seulement dans le liquide le réservoir et le bas de la tige jusqu'au degré 6? La température extérieure est 12°.

17° On forme un thermomètre à eau avec un thermomètre à tige. Il marque 20° dans la glace fondante, 85 dans un bain liquide à 45°. Calculer la dilatation μ_{45} de l'eau de 0° à 45°.

18° Un thermomètre à échelle arbitraire marque 12° dans la glace fondante, et 194° dans la vapeur d'eau bouillante sous une pression de 75 centimètres de mercure. Quel degré marquera ce thermomètre à 40° centigrades?

19° Un vase en verre est rempli à 0° par 120 grammes de mercure et un morceau de fer de 100 grammes. On chauffe à 50°. Quelle est la masse du mercure qui sort? Densité du fer, 7,78; densité du mercure, 13,59; coefficient de dilatation cubique du fer $\frac{1}{28200}$, du mercure $\frac{1}{5550}$, du verre $\frac{1}{38700}$.

20° Un aréomètre à graduation uniforme (genre Baumé) marque 0 degré dans l'eau pure à 0°, 40 degrés dans un certain liquide de densité 1,52 à la même température. A quelle division s'arrêtera-t-il dans ce dernier liquide à la température de 60°? Coefficient de dilatation cubique du verre : 0,000026; coefficient de dilatation du liquide : 0,000836. On négligera les effets capillaires, et l'on admettra que la densité de l'eau à 0° ne diffère pas sensiblement de 1.

21° Une tige de fer F, verticale, fixée à son extrémité supérieure en un point A, est terminée à sa partie inférieure par un étrier E qui supporte un vase cylindrique de verre M renfermant du mercure. La longueur totale de la tige et de l'étrier est $0^{m}75$. Le vase de verre a 2 centimètres carrés de section intérieure. Quel poids de mercure faut-il verser pour que le centre de gravité du pendule reste à une distance constante de A (*pendule compensateur de Graham*)? On considérera le poids du fer et le poids du cylindre de verre comme négligeables par rapport au poids du mercure.

DILATATION DES GAZ

22° A quelle température x faut-il chauffer une masse de gaz à 0°, pour que son volume double, la pression restant constante?

23° 15 litres d'air sont refroidis de 27° à 7°; quelle est la diminution de volume?

24° Quel serait le coefficient de dilatation des gaz en prenant pour unité de température un degré du thermomètre Fahrenheit? $\alpha = \frac{1}{273}$ avec la graduation centigrade.

25° Le volume d'une masse de gaz à 15° est 400 centimètres cubes; à quelle température t le volume sera-t-il 500 centimètres cubes, la pression restant invariable?

26° Quel est à 20° le volume d'un kilogramme de platine? Quelle perte de poids éprouve-t-il dans l'air? Densité du platine, 22.

27° Un ballon de 3l,660 renferme 6gr,3 d'un gaz à 21° et 75 de pression. Quelle est la densité de ce gaz à 0°?

28° Dix litres d'un gaz à 27° sous la pression 68,4 pèsent 16gr15. Quelle est dans ces conditions la densité de ce gaz par rapport à l'air?

29° Un gaz, dont la densité par rapport à l'air est 1,135, est recueilli à 25° sur le mercure dans une cloche graduée dont il occupe 752cc. Le mercure s'élève de 15 centimètres dans la cloche, la pression barométrique est 74. Quelle est la masse du gaz?

30° De l'oxygène est enfermé a 0° dans une bouteille en acier de volume invariable, sous une pression de 100 atmosphères. La température de la bouteille est portée à 50°, quelle sera la nouvelle valeur de la pression?

31° On veut construire un aérostat capable d'enlever 1000 kilogrammes avec une force ascensionnelle de 10 kilogrammes au départ. Quel sera son volume V si on le gonfle avec de l'hydrogène? Température, 15°; pression, 75; poids de l'enveloppe et de la nacelle, 100 kilogrammes. Densité de l'hydrogène : 0,069.

32° A quelle température x faut-il élever l'air d'un ballon à air chaud dont l'enveloppe et la nacelle pèsent 130 kilogrammes, et dont le volume est 200 mètres cubes, pour qu'il reste en équilibre dans l'air sec a 0°? On suppose que le volume du ballon est constant.

33° Un ballon du volume de 60 mètres cubes est rempli d'hydrogène dont la densité par rapport à l'air est 0,069. Quel doit être le poids de l'enveloppe pour qu'il atteigne une hauteur où la température est 5° et la pression 152mm?

34° La densité de l'hydrogène à 0° et 76 est 9.10^{-5} grammes. Quelle est la pression H exercée par 1 gr. d'hydrogène occupant 40 cm³ à 17°?

35° A quelle température l'oxygène sous la pression 19 a-t-il la même densité que l'hydrogène à 0° et 76? Densités de l'oxygène et de l'hydrogène par rapport à l'air : 1,1056 et 0,069.

36° Sous une même pression une masse d'air à 150° occupe le même volume qu'une masse d'hydrogène à 50°. Quel est le rapport de la masse d'air à la masse d'hydrogène? Densité de l'hydrogène par rapport a l'air : 0,0692.

37° Un récipient muni d'un robinet et rempli d'air a 0° et H pèse M. On le porte plein d'air dans une étuve à une température inconnue. Quand on a attendu assez longtemps pour que l'équilibre soit rétabli, on ferme le robinet et on pèse : on trouve un poids m. Quelle est la température de l'étuve? La pression n'a pas varié. On négligera la dilatation de l'enveloppe.

38° Quel est le rapport des volumes occupés a 1000° et à 500° par une même masse de vapeur de soufre à une même pression H? La densité de vapeur du soufre est 6,6 à 500° et 2,2 à 1000°.

39° Un milligramme d'air à 27° occupe 20 centimètres cubes dans la chambre d'un baromètre qui marque 73. Calculer la hauteur barométrique H, sachant que le volume d'un gramme d'air à 0° et 76 est 773,4 centimètres cubes.

40° On mélange 8 litres d'azote à 74 centimètres de pression et 3 litres d'oxygène à 76 centimètres, les deux gaz étant a 14°. On porte le tout a 0°, et on réduit le volume à 10 litres. Quelle est la pression?

41° Deux ballons dont les volumes sont invariables contiennent, l'un 10 litres d'air à 0° et 75 de pression, l'autre 20 litres d'air à 17° et 80. On fait communiquer les deux ballons et on les porte à 27°. Que devient la pression?

42° Un récipient, plein d'air à 0° et à la pression 76, est muni d'une soupape ayant une surface de 10 centimètres carrés, chargée d'un poids de 30 kilogrammes. A quelle température faut-il chauffer ce récipient pour que la soupape s'ouvre? On ne tiendra pas compte de la dilatation du récipient.

43° Un vase cylindrique bien clos renferme une masse d'eau au-dessus de laquelle se trouve un espace libre rempli par de l'air sous la pression normale. Le volume de cet espace libre supposé invariable est de 40 centimètres cubes.

Deux électrodes de platine plongées dans l'eau permettent d'y faire passer un courant électrique qui décompose 3 grammes d'eau. Calculer la pression du mélange du gaz renfermé dans le vase. La température sera supposée constante et égale à zéro. On ne tiendra pas compte de la tension de la vapeur d'eau ni de la solubilité des gaz.

FUSION ET VAPORISATION

44° Quel accroissement de volume éprouve 1 gramme d'eau à 100° en passant à l'état de vapeur saturante à la même température? A 100° la densité par rapport à l'air de la vapeur d'eau saturante est 0,640.

45° Quel serait dans le problème précédent l'accroissement de volume calculé en prenant $\frac{5}{8}$ pour la densité de la vapeur d'eau par rapport à l'air?

46° Une certaine masse de vapeur d'eau a pour volume 15 litres, pour température 50°, et pour force élastique 12 millimètres. On réduit son volume à 10 litres: que devient sa force élastique? La force élastique maximum de la vapeur d'eau à 50° est $F_{50} = 92$ millimètres.

47° Le volume d'une masse de vapeur d'eau à 50° est 10 litres, et sa force élastique 75 millimètres; on réduit son volume à 5 litres. Quelle est la masse de la vapeur condensée? ($F_{50} = 92$ millimètres).

48° Une chambre de 120 mètres cubes de capacité est remplie d'air saturé d'humidité à la température de 15°. Calculer la masse d'eau qui sera déposée quand la température s'abaissera à 0°. La tension maximum de la vapeur d'eau à 15° est 12mm7, à 0° elle est 4mm7; densité de la vapeur d'eau par rapport à l'air 0,622; la masse du litre d'air à 0° et 76 est 1gr293.

49° Calculer la masse de la vapeur d'eau contenue dans 20 litres d'air saturé d'humidité à 20° ($F_{20} = 17^{mm}4$).

50° Un mètre cube d'air à 20° contient 10 grammes de vapeur d'eau. Quelle est la force élastique de cette vapeur?

51° L'analyse chimique a donné $C^{12}H^{22}O^{11}$ pour la formule brute (avec les exposants les plus petits) du sucre de canne (en prenant C = 12, H = 1 et O = 16). On a constaté qu'une solution dans l'eau contenant 34gr2 de sucre par litre, se congèle à — 0°,19. Calculer le poids moléculaire du sucre de canne. On donne le nombre 1850 pour l'abaissement constant du point de congélation avec l'eau comme dissolvant, pour une masse dissoute dans un gramme.

52° Quel est le volume d'air saturé à 20° qui renferme 1 kilogramme de vapeur d'eau? ($F_{20} = 17^{mm}4$.)

53° Quelle est la masse de 20 litres d'hydrogène saturé de vapeur d'eau à 50°? La pression du gaz est 47cm2 ($F_{50} = 92$ millimètres).

54° On mélange 100 litres d'air saturé d'humidité à 15° et 100 litres d'air saturé à 0°. Le volume du mélange est 200 litres à 7°5. Calculer la masse de la vapeur condensée.

55° Un aérostat contient 10 mètres cubes de gaz hydrogène sec à 15°; il est plongé dans un air dont la pression est 75,6 et la température 15°, la tension de la vapeur d'eau de l'air est 6mm5. L'aérostat pèse 5 kilos 600. On demande quel poids il faudra attacher à l'aérostat pour qu'il se tienne en équilibre.

HYGROMÉTRIE

56° Un mètre cube d'air à 20° contient 10 grammes de vapeur d'eau. Quel est l'état hygrométrique de cet air? $F_{20} = 17^{mm}4$.

57° Quelle est la masse de 592 centimètres cubes d'air à 15° sous la pression 74 et à l'état hygrométrique 0,84? $F_{15} = 12^{mm}7$.

58° Quelle perte de poids éprouvera par son immersion dans l'air un ballon de 10 litres à 20°, la pression étant 75 et l'état hygrométrique $\frac{3}{4}$?

59° Un mètre cube d'air humide à 20° a un état hygrométrique égal à $\frac{3}{4}$. Quelle est la masse de vapeur d'eau qui se liquéfiera si la température s'abaisse à 0°? $F_{20} = 17^{mm}4$; $F_0 = 4^{mm}6$.

60° En déterminant l'état hygrométrique de l'air par la méthode chimique, on a fait écouler 58 litres d'eau de l'aspirateur à 20°. Le poids de vapeur condensée est $0^{gr}25$, la température extérieure 10° et la pression 75. Quel est l'état hygrométrique? $F_{10} = 9^{mm}16$.

61° Un ballon de verre renferme à 30° de l'air à l'état hygrométrique $\frac{1}{2}$ et à la pression 76,5. Il a, à cette température, une capacité intérieure égale à 3 litres. On le refroidit graduellement jusqu'à zéro. Quelle est la masse de vapeur d'eau qui se condense et quelle est la pression finale à l'intérieur du ballon? On négligera la dilatation de l'enveloppe. $F_0 = 4^{mm}5$; $F_{30} = 31^{mm}5$; le coef. de dil. de l'air et de la vapeur d'eau est 0,00367. La masse du litre d'air à 0° et 76 est $1^{gr}293$; la densité de la vapeur d'eau par rapport à l'air est 0,622.

62° Un récipient de 10 litres de capacité est rempli d'air sec à 0° et 76. On y introduit par un robinet à goutte 3 gr. d'eau, et on chauffe le tout à 100°. On demande : 1° que devient l'état hygrométrique de cet air? 2° quelle est la pression totale de cet air humide? On néglige la dilatation de l'enveloppe.

CALORIMÉTRIE

63° Un vase en laiton pesant 30 gr. contient 500 gr. d'eau à 20°; on y plonge 108 gr. d'un corps chauffé à 100°; la température finale est 21°815. Quelle est la chaleur spécifique du corps? Chaleur spécifique du laiton : 0,09.

64° Pour déterminer la température d'un bain en fusion, on y fait tomber un fragment de platine pesant 500 grammes; on retire le platine et on le porte dans une masse de 950 grammes d'eau à 0°. La température finale est 10°. Calculer la température T du bain, en prenant 0,032 pour chaleur spécifique moyenne du platine. On admettra que la masse du bain en fusion est assez considérable pour que le platine n'en change pas la température.

65° Un calorimètre contient 70 grammes d'eau à 10°, on y verse 50 grammes d'eau à 50°. La température d'équilibre est 25°. Quelle est la capacité calorifique du calorimètre?

66° Combien de calories abandonnent 50 litres d'air en se refroidissant de 25° à 5°? Masse du litre d'air $1^{gr}293$. Chaleur spécifique de l'air : 0,237.

67° Un morceau de glace pesant 725 grammes est placé dans un calorimètre contenant 2500 grammes d'eau à + 5°. L'équilibre thermique étant établi, on trouve que la glace pèse 64 grammes de plus qu'au début. Quelle était la température initiale de la glace? Chaleur spécifique de la glace 0,5; chaleur latente de la glace 80. On négligera la capacité du calorimètre, ainsi que les échanges de chaleur avec l'extérieur.

68° Dans un vase métallique complètement entouré de glace fondante, on introduit une sphère de cuivre de 3 Kg. chauffée à 100°; l'eau provenant de la fusion de la glace a été recueillie et pesée; sa masse est de 360 gr. Quelle est la chaleur spécifique du cuivre? Chaleur de fusion de la glace : 80.

69° On mélange 300 grammes de glace fondante et 700 grammes d'eau à 100°. Quelle sera la température finale du mélange?

70° La Terre reçoit du Soleil, à midi, 3 calories par décimètre carré et par seconde. Quelle épaisseur x de glace la chaleur solaire pourra-t-elle fondre en une heure à la surface du sol? Densité de la glace : 0,92; chaleur de fusion de la glace : 80.

71° Dans la cavité d'un puits de glace on enferme une masse d'étain de 50 grammes à 100°. Quelle est la masse de glace fondue? Chaleur spécifique de l'étain : 0,056.

72° Quelle diminution de volume éprouve un mélange de glace et d'eau à 0° recevant 150 calories?

73° Quelle masse m de mercure à 100° faut-il introduire dans un mélange de glace et d'eau pour produire une diminution de volume de $0^{cc},0567$?

74° Du phosphore est maintenu en surfusion. De combien de degrés au-dessous du point de fusion conviendra-t-il de le refroidir pour qu'une solidification brusque ramène toute sa masse au point de fusion?

On prendra 5,4 pour la chaleur de fusion du phosphore et 0,20 pour sa chaleur spécifique à l'état solide.

75° De l'eau refroidie à — 20° est solidifiée brusquement. Quelle est la fraction de la masse totale qui se solidifie? Chaleur spécifique de la glace 0,5.

76° Dans un calorimètre dont la valeur en eau est 1000 grammes, on fait condenser 26 grammes de vapeur d'eau à 100°. La température initiale du calorimètre est 4°, sa température finale 20°. Quelle est la chaleur L de vaporisation de l'eau à 100°? On négligera les variations de température par rayonnement et par conductibilité.

77° Pour élever de 20° à 80° la température de 2 mètres cubes d'eau, combien faut-il y condenser de litres de vapeur d'eau à 100° et à 76 de pression? La chaleur de vaporisation de l'eau à 100° est 537; on prendra $\frac{5}{8}$ pour densité de la vapeur d'eau.

78° Pour porter 300 kilogrammes d'eau de 11° à 28°, quelle masse M de vapeur à 121° faut-il y condenser?

79° Dans un calorimètre à eau on fait arriver 2 kg. de vapeur d'éther à 35°; la température initiale étant 10°, à quelle température monte le thermomètre?

Chaleur de vaporisation de l'éther	90
Chaleur spécifique de l'éther	0,5

80° Quelle est, d'après la loi de Dulong et Petit, la chaleur spécifique de l'Indium si son poids atomique est 113,4?

THÉORIE MÉCANIQUE DE LA CHALEUR

81° Un gr. d'air est chauffé de 0° à 100° sous une pression de 76 cm. Quel est le travail externe de dilatation? La densité de l'air à 0° et 76 est 0,001293.

82° Du mercure tombe de 5 mètres sur une surface dépourvue de conductibilité. De combien de degrés s'élèvera sa température après sa chute? Chaleur spécifique du mercure : 0,033.

83° Une balle de plomb dont la vitesse est de 500 mètres par seconde vient choquer un mur résistant. Quelle sera l'élévation de température? Chaleur spécifique du plomb solide : 0,0314. Chaleur spécifique du plomb liquide 0,0402. Point de fusion : 330°. Chaleur de fusion : 5,37.

84° Du mercure tombant d'une hauteur de 1^m275 sur une surface dépourvue de conductibilité s'échauffe de $\frac{1}{10}$ de degré. Déduire de cette expérience l'équivalent mécanique de la calorie.

Quel poids de mercure faudrait-il laisser tomber dans ces conditions pour produire le nombre de calories nécessaires à la transformation d'un gramme d'eau à 0° en vapeur saturante à 100°? Chaleur spécifique du mercure : 0,03; la chaleur de vaporisation de l'eau à 100° sera prise égale à 537.

85° En admettant que la chaleur de combustion de 1 gramme d'hydrogène est 34500 calories, exprimer en joules le travail qui peut être produit par la combustion de 5 grammes d'hydrogène.

86° En prenant pour unité de longueur le mètre, pour unité de poids le kilogramme, pour unité de chaleur la grande calorie, l'équivalent mécanique de la Calorie est 426. Trouver l'équivalent mécanique de la petite calorie dans le système C. G. S.

87° Un train, ayant une masse de 250 tonnes, est animé d'une vitesse de 20 mètres à la seconde. Quelle sera la chaleur développée si on l'arrête en serrant les freins?

88° Une bille, de masse m, de chaleur spécifique 0,1, tombe de 100 mètres et rebondit à 20 mètres. Quelle élévation de température prend la bille, en admettant qu'elle garde la chaleur développée au moment du choc? $g = 981$.

89° Calculer en joules l'énergie qu'il faut dépenser pour la décomposition de 9 grammes d'eau.

90° Un gramme d'un charbon donne en brûlant 7850 calories. Quel est l'équivalent mécanique de cette chaleur en ergs et en kilogrammètres?

91° Si 1 gramme de gaz d'éclairage développe en brûlant 6000 calories, quel travail pourra-t-on produire en utilisant complètement sa chaleur?

92° Une sphère de plomb, non élastique, dont la température initiale est 20°, tombe librement d'une hauteur de 100 mètres sur un plan parfaitement résistant. On suppose que toute l'énergie perdue au moment du choc est transformée en chaleur absorbée par la sphère, et on demande : 1° la température de la sphère aussitôt après le choc; 2° quelle vitesse il faudrait lui imprimer au départ, de haut en bas, pour porter le métal à sa température de fusion. Chaleur spécifique C du plomb 0,0315; température de fusion T = 335°; équivalent mécanique de la chaleur . 425; intensité de la pesanteur : 9,81.

93° Quel est le travail externe effectué par 1 kilogramme d'eau à 0° qui passe à l'état solide à la même température? Densité de la glace : 0,92. On prendra 1 pour la densité de l'eau à 0°.

94° Un gramme de glace à 0° exige 80 calories pour fondre. Quel est l'accroissement d'énergie potentielle de l'eau de fusion en négligeant la très petite variation de volume au moment de la fusion?

95° Sachant que l'eau, en passant de l'état liquide à 100° à l'état de vapeur à la même température et à la pression 76, prend un volume 1650 fois plus grand, évaluer le travail externe que la vapeur d'eau effectue en se dilatant et la chaleur correspondante.

96° Quel est l'accroissement d'énergie potentielle de l'eau qui passe de l'état liquide à 100° à l'état de vapeur à la même température et à la pression 76?

97° Un récipient métallique renfermant de l'air comprimé est placé dans un calorimètre. La valeur en eau du calorimètre et de son contenu est 10700 grammes : on laisse l'air s'échapper brusquement : l'air écoulé occupe 44 litres à la pression 76. On observe au calorimètre un refroidissement de 0°1. En déduire l'équivalent mécanique de la calorie.

MACHINES A VAPEUR

98° Combien de grammes d'eau à 100° pourrait-on réduire en vapeur à la même température avec la chaleur dégagée par la combustion de 1 gramme de charbon?

99° Une machine à vapeur consomme 900 grammes de charbon par cheval-heure. Un kilogramme de charbon dégage en brûlant 8000 Calories. Quel est le rendement de la machine?

100° Une machine de 20 chevaux-vapeur consomme 56 kilogrammes de charbon par heure; quel est son rendement?

101° Quel est le rendement d'une machine thermique qui consomme 40 kilogrammes de charbon par heure et élève dans le même temps 30 mètres cubes d'eau à la hauteur de 50 mètres?

102° Quelle est la grandeur de la pression exercée par la vapeur d'eau à 153° sur une surface de 1 mètre carré? A 153°, la force élastique maximum de la vapeur d'eau est de 5 atmosphères.

103° Un piston de 20 décimètres carrés de surface est poussé sur une de ses faces par de la vapeur à 5 atmosphères de pression et sur l'autre par la pression atmosphérique. La course du piston est de 50 centimètres. Quel est le travail effectué par le piston pendant sa course?

104° Les bras du levier d'une soupape de sûreté ont 3 centimètres et 54 centimètres; à l'extrémité du long bras est suspendu un poids de 10 kilogrammes. Si la surface de la soupape est de 12 centimètres carrés, quelle pression en

atmosphères devra dépasser la vapeur d'eau dans la chaudière pour que la soupape s'ouvre?

105° Un frein est installé sur l'arbre d'une machine à vapeur de 10 chevaux-vapeur. En supposant que tout le travail de la machine est absorbé par le frein, quel poids d'eau à 10° faut-il verser par minute sur les mâchoires du frein pour les maintenir à 50°?

106° Une machine à vapeur produisant pratiquement 20 chevaux-vapeur consomme 800 grammes de charbon par cheval et par heure. La vapeur qui pousse le piston est à 180° et le condenseur à 40°. Calculer la puissance qu'aurait la machine si toute la chaleur de combustion du charbon était transformée en travail. Calculer la puissance qu'elle aurait, d'après le principe de Carnot, si elle était parfaite. 1 kilogramme de charbon donne en brûlant 8.000 calories.

107° Le piston d'une machine à vapeur a une section de 400 cm², la surface de son diagramme à l'indicateur de Watt est de 200 cm². Un cm. en ordonnée correspond à une pression de 250 gr. par cm²; un cm. en abscisse à une course du piston de 5 cm. Quel est le travail effectué par coup de piston?

108° Le cylindre d'une machine à double effet a un diamètre de 10 centimètres. La course du piston est de 30 centimètres. L'arbre conduit par la bielle fait 180 tours par minute. La pression de la vapeur qui pousse le piston est de 10 kg. par cm². La pression dans le condenseur étant négligée, quelle est la puissance de la machine?

ACOUSTIQUE

PROPAGATION DU SON

1° La vitesse du son dans l'air à 0° étant 330m6, quelle est la vitesse à 30°?

2° A quelle température la vitesse de propagation du son dans l'air est-elle 336 mètres?

3° On demande la distance qui sépare deux stations, sachant que le bruit du canon a parcouru cette distance en 20 secondes à 22°.

4° Calculer la vitesse du son dans l'hydrogène, lorsque la vitesse dans l'air est 340 mètres.

5° Un cri poussé devant un mur par un observateur lui revient après une seconde et demie. Quelle est sa distance au mur?

6° On laisse tomber une pierre au fond d'un puits, et entre le moment où on l'abandonne et celui où on entend le bruit de sa chute dans l'eau, on compte 3 secondes. On demande la profondeur du puits. On prendra 340 mètres pour vitesse du son et $g = 9^{m}8$.

7° Quelle est la longueur d'onde dans l'air d'un son dont le nombre de vibrations est 435, la vitesse de propagation du son dans l'air étant 331 mètres?

8° Quelle est la longueur d'onde dans l'air d'un son qui correspond à 40 vibrations par seconde, à une température où la vitesse de propagation dans l'air est 336 mètres?

9° Quelle est la longueur d'onde dans l'eau du son précédent? La vitesse de propagation du son dans l'eau est 1435 mètres à 8°.

10° Calculer l'indice de réfraction, pour le son, de l'acide carbonique par rapport à l'air; la densité de l'acide carbonique par rapport à l'air est 1,52.

11° Le disque mobile d'une sirène a 24 trous. Quelle est la hauteur du son rendu quand il fait 1104 tours par minute?

SONS MUSICAUX, TUYAUX SONORES

12° Quelle est dans l'air à 0° la longueur d'onde du son ut_3? La vitesse du son dans l'air à 0° est 330,6 mètres.

13° Un tuyau ouvert, de 64,56 centimètres de long, est rempli d'air à 10°;

quelle est la hauteur du son fondamental? La vitesse du son dans l'air à 10° est 337 mètres.

14° Quelle est la longueur L du tuyau fermé qui, rempli d'air à 10°, donne un son fondamental de 261 vibrations?

15° Le plateau mobile d'une sirène porte 24 trous. il fait 979 tours en une minute. Quelle est la note rendue?

16° Quelle est la longueur L d'un tuyau ouvert ayant à 10° si_3 pour note fondamentale? Le nombre des vibrations de si_3 est $435 \frac{9}{8} = 489,375$.

17° Un tuyau fermé donne $ré_3$ pour troisième harmonique à 10°; quelle est la longueur L de ce tuyau?

18° Un tuyau donne dans l'air à 10° un son de 256 vibrations par seconde; plongé dans l'eau, il donne 1150 vibrations. La vitesse V du son dans l'air à 10° étant 337 mètres, quelle est la vitesse V' du son dans l'eau?

19° On fait parler tour à tour un même tuyau sonore avec l'air et avec l'hydrogène, à la température de 16°. Le tuyau donne ut_3 avec l'air et si_4 avec l'hydrogène, pour deux harmoniques de même ordre. Quelle est la vitesse du son dans le gaz hydrogène, en admettant 340 mètres pour la vitesse du son dans l'air?

20° Un tuyau ouvert, d'une longueur de 142 cm., rend dans l'air la_3 pour son fondamental. Quelle est la longueur du tuyau fermé, qui, dans l'anhydride carbonique, a aussi la_3 pour son fondamental? La densité de l'anhydride carbonique par rapport à l'air est 1,52.

VIBRATIONS DES CORPS SOLIDES

21° Le marteau interrupteur d'une bobine de Ruhmkorff fait entendre la note fa_2; quel est le nombre des vibrations par seconde?

22° Une corde de 50 centimètres de longueur et ayant une masse de 80 grammes, exécute 100 vibrations par seconde. Quel est, en gr., le poids tenseur?

23° Trouver la hauteur du son rendu par un fil d'acier, de densité 7,8, ayant 1 m. de longueur, 1 mm. de diamètre, et tendu par un poids de 42,54 kg.

24° Quelle est la note rendue par une corde de 50 centimètres de longueur, pesant 2gr31 par mètre, et tendue par un poids de 25 kilos? Quelle est la longueur d'onde de cette note à 10°?

25° Une corde métallique tendue sur un sonomètre donne le son fondamental fa_1; sachant que la_3 correspond à 435 vibrations doubles par seconde, quels sont les nombres de vibrations qui correspondent aux six premiers harmoniques qui suivent le son fondamental?

26° Deux cordes identiques rendent deux sons à l'intervalle de quinte; le poids tenseur étant 2 kg., pour la note la plus grave, quel est-il pour l'autre?

27° Quelle doit être la vitesse v d'une locomotive qui s'approche d'un observateur pour que le son rendu par le sifflet soit diesé? Température 10°.

28° Quelle doit être la vitesse d'une locomotive qui s'approche d'un observateur pour que le son du sifflet s'élève d'un demi-ton? Vitesse du son 340 mètres par seconde.

OPTIQUE

PHOTOMÉTRIE

1° Quelle est la distance à la Terre d'une étoile dont la lumière nous arrive en 5 ans? Vitesse de la lumière 300.000 km. par seconde.

2° Quelle est la hauteur H d'une tour projetant une ombre de 42 mètres de longueur, alors qu'une tige verticale de 1 mètre de haut offre une ombre de 60 centimètres?

3° Dans une chambre noire dont l'ouverture a 1 centimètre de diamètre on place à 1 mètre de l'ouverture un écran qui reçoit normalement les rayons solaires. Quel sera le diamètre D de l'image circulaire obtenue? Le diamètre apparent du Soleil est de 32′.

4° Deux flammes, d'intensité 16 et 9, sont distantes de 140 centimètres; où faut-il placer un écran sur la ligne qui les joint pour qu'il soit également éclairé par les deux sources?

5° Une lampe à incandescence, placée à une distance de 1 mètre d'un écran, produit le même éclairement qu'un bec Auer d'une intensité de 64 bougies placé à 3 mètres. Quelle est l'intensité de la lampe à incandescence?

6° Le filament de carbone d'une lampe à incandescence de 32 bougies, traversé par un courant de $0^{amp},09$, sous 110 volts, a un diamètre de $0^{mm}18$ et une longueur de 250 mm. Quel est son éclat intrinsèque en bougies par cm^2?

RÉFLEXION DE LA LUMIÈRE

7° La flamme d'une bougie, haute de 2 centimètres, est placée perpendiculairement à l'axe principal en avant d'un miroir concave à une distance de 40 centimètres. La distance focale du miroir est 30 centimètres. Quelle est la position et la grandeur de l'image?

8° Quand un rayon lumineux se réfléchit successivement sur deux miroirs faisant entre eux un angle ω, la direction du rayon réfléchi fait un angle 2ω avec la direction du rayon incident.

9° Quand un miroir tourne d'un angle x autour d'un axe I passant dans son plan, l'image d'un point A tourne d'un angle $2x$ autour du même axe.

10° Quel est le diamètre de l'image du Soleil dans un miroir concave de 1 mètre de rayon? Le diamètre apparent du Soleil est de 32′.

11° Avec le miroir concave précédent recevant les rayons solaires et ayant un diamètre de base de 1 mètre, dans quel rapport l'éclairement est-il accru au foyer?

12° A quelle distance d'un miroir concave de 5 centimètres de foyer doit être placée une petite droite perpendiculaire à l'axe principal pour que son image soit agrandie 5 fois?

13° Un point lumineux se trouve à une distance de 24 centimètres d'un miroir concave de 5 centimètres de foyer; où est son image? Si le point lumineux s'éloigne de 3 centimètres du miroir, de combien se déplace l'image?

14° A quelle distance un objet réel doit-il être placé d'un miroir convexe pour que son image soit égale à la moitié de l'objet?

15° Un objet de 4 centimètres de hauteur est placé perpendiculairement à l'axe principal, à 10 centimètres d'un miroir convexe de 30 centimètres de distance focale. Trouver la position et la grandeur de l'image.

RÉFRACTION DE LA LUMIÈRE

16° Un rayon de lumière homogène tombe sous l'incidence $i = 30^0$ sur une lame de verre à faces parallèles d'indice $\frac{3}{2}$ et de 20 centimètres d'épaisseur. Calculer le déplacement latéral du rayon incident.

17° Un petit objet brillant est au fond d'une rivière limpide de 2 mètres de profondeur; il est vu sous une incidence normale. Quelle est sa distance apparente? L'indice de l'eau par rapport à l'air est $\frac{4}{3}$.

18° Quel est l'indice de réfraction du verre par rapport à l'eau? Indice de l'eau par rapport à l'air $\frac{4}{3}$: indice du verre par rapport à l'air $\frac{2}{3}$.

19° Pour quelle incidence aura lieu la réflexion totale d'un point lumineux qui passe du verre dans l'eau?

20° Soit un prisme dont l'angle réfringent est de 60^0. On fait tomber un fais-

ceau de rayons jaunes dans la section principale sous un angle d'incidence de 45°; l'indice de réfraction est $\sqrt{2}$. Quelle est la déviation?

21° L'indice de réfraction du flint-glass est 1,635 pour la lumière jaune de l'alcool salé; quelle sera la déviation produite par un prisme d'un angle de 2° pour un rayon jaune tombant sous une petite incidence?

22° Quel est l'angle d'un prisme d'eau qui produirait pour de petites incidences la même déviation qu'un prisme de verre de 2°? Indice de réfraction de l'eau $\frac{4}{3}$; indice de réfraction du verre $\frac{3}{2}$.

23° Calculer l'indice de réfraction d'un prisme pour une radiation déterminée, sachant que l'angle réfringent est de 60° et l'angle de déviation minimum pour cette radiation égal à 30°.

24° Un rayon de lumière tombe perpendiculairement sur l'une des faces d'un prisme dont l'angle réfringent est de 30°; on mesure la déviation δ que ce rayon subit par la réfraction. Calculer l'indice de réfraction m de la substance du prisme, en supposant que l'angle de déviation est de 30°?

25° L'indice de réfraction du verre étant $\frac{3}{2}$, quelle est la valeur minimum de l'angle réfringent A d'un prisme de verre pour laquelle aucun des rayons incidents ne pourra sortir?

26° Un rayon lumineux tombe sur la face AB d'un prisme BAC sous une incidence de 45°. Quel doit être l'angle A du prisme pour que le rayon émergent soit normal à la face AC? Indice de réfraction $\frac{3}{2}$.

27° Calculer l'angle de déviation minimum pour un prisme d'un angle de 60°, d'indice $\frac{3}{2}$.

LENTILLES

28° Un objet d'une hauteur de 5 centimètres est placé perpendiculairement à l'axe principal, à 12 centimètres en avant d'une lentille convergente de 8 centimètres de distance focale; quelle est la position et la grandeur de l'image?

29° Une bougie est à une distance D d'un écran sur lequel on projette son image avec une lentille convergente. On reconnaît que les deux positions L et L′ de la lentille pour lesquelles on obtient une image distincte de la bougie sont distantes de a. Quelle est la distance focale de la lentille?

30° Un objet est placé à 15 centimètres d'une lentille divergente de 10 centimètres de longueur focale, quelle est la position de l'image et quel est le rapport de grandeur de l'image à l'objet?

31° La distance focale d'une lentille divergente est 25 centimètres. Où doit être placé un petit objet perpendiculaire à son axe principal pour que son image soit réduite à $\frac{1}{6}$ de la grandeur de l'objet?

32° Une lentille convergente d'une distance focale de 16 centimètres est appliquée contre une lentille divergente. L'axe principal des deux lentilles est le même. La distance focale du système est 48 centimètres. Quelle est la distance focale de la lentille divergente?

33° Deux lentilles convergentes minces, de même axe principal, sont accolées; leurs distances focales sont 25 centimètres et 10 centimètres. Quelle est en dioptries la convergence de la lentille unique équivalente?

34° Une petite droite perpendiculaire à l'axe, placée à trois centimètres d'une lentille convergente, donne une image virtuelle grossie trois fois. Quelle est la distance focale de la lentille?

35° Pour obtenir l'indice de réfraction d'une lentille bi-convexe, on mesure sa distance focale $F = 44$ centimètres, et les rayons de courbure de ses faces : $r = 33$ centimètres, $r' = 66$ centimètres. Quel est l'indice?

36° Un objet est placé devant une lentille convergente de façon à donner une image réelle; à quelle distance de la lentille doit-il être placé pour que la distance de l'image à l'objet soit minimum?

37° Un objet est placé à 430 centimètres d'un écran sur lequel on veut projeter son image avec une lentille convergente; la distance focale de cette lentille est égale a 50 centimètres. A quelle distance de l'écran doit être placée la lentille et quel est le rapport de la grandeur de l'image à celle de l'objet?

38° Un point lumineux P se trouve sur l'axe principal d'une lentille convergente C de 50 centimètres de distance focale à 25 centimètres de la lentille. Après avoir traversé la lentille, les rayons se réfléchissent sur un miroir plan perpendiculaire à l'axe de la lentille et distant de la lentille de 25 centimètres. Après cette réflexion, les rayons traversent de nouveau la lentille convergente. Où se forme l'image définitive?

39° Un point lumineux P est placé sur l'axe principal d'une lentille convergente dont le diamètre est $2r$ et la distance focale f. Un écran est placé au foyer principal situé du côté opposé par rapport à la lentille. Quel est le rayon du cercle éclairé par les rayons émanés du point P et qui ont traversé la lentille? On supposera P au delà, puis en deçà du foyer.

40° Démontrer que dans une lentille biconvexe à rayons égaux, d'indice $\frac{3}{2}$, les foyers coïncident avec les centres de courbure.

41° Un cercle a une surface de 2 mètres carrés, on veut en obtenir une image photographique d'une surface de 50 centimètres carrés. A quelle distance du cercle faut-il placer l'objectif qui a 20 centimètres de distance focale?

INSTRUMENTS D'OPTIQUE

42° A 1000° centigrades, un centimètre carré d'un corps noir rayonne 3,86 calories, à quelle température son rayonnement sera-t-il double?

43° Un presbyte dont la distance minimum de vision distincte est $1^m,20$ veut lire à 30 centimètres. Quelle est la convergence des lentilles qu'il devra employer (verres supposés placés contre les yeux)?

44° En prenant égal à 1′ le pouvoir séparateur angulaire ε d'un œil, quelle sera la distance linéaire minimum de deux points vus distinctement à 20 cm.?

45° Calculer la puissance d'une loupe dont la distance focale est 2 centimètres et l'angle sous lequel elle fera voir 1 millimètre.

46° Les distances focales d'un microscope composé étant 5 millimètres pour l'objectif et 20 millimètres pour l'oculaire, l'objet étant placé à $5^{mm}1$ et la distance minimum de la vision distincte de l'observateur étant 20 centimètres, calculer l'angle sous lequel on verra 1 millimètre?

47° Calculer le grossissement linéaire et le grossissement en surface avec les mêmes données.

48° Sur l'axe principal d'une loupe dont la distance focale est 1 centimètre on place un objet. A quelle distance du foyer doit-il se trouver pour un observateur dont l'œil, placé à l'autre foyer, est accommodé pour voir à 25 cm.?

49° Le *punctum remotum* d'un œil myope est à 20 centimètres de cet œil. Quel est le numéro de la lentille capable de corriger cette myopie?

50° Le *punctum remotum* d'un œil est à $0^m,80$, son *punctum proximum* est à $0^m,15$. Quelle est la puissance en dioptries d'une lentille convergente qui produirait le même effet que l'accommodation?

51° Deux loupes ont séparément pour distance focale 5 millimètres et 7 millimètres, on les accole. En négligeant leurs épaisseurs, quelle est la puissance pour un millimètre du système ainsi formé?

52° On regarde le Soleil avec une lunette astronomique dont l'objectif a une distance focale de 70 centimètres et l'oculaire une distance focale de 4 centimètres. Le diamètre apparent du Soleil vu directement étant 32′, quel est le diamètre apparent de l'image?

53° Avec une lunette astronomique primitivement réglée pour voir à l'infini, on doit écarter l'oculaire de 4 centimètres pour voir nettement un objet placé à 5 mètres. Quelle est la distance focale de l'objectif?

54° Un observateur, dont la distance de la vision distincte est 40 centimètres,

vise avec une lunette astronomique un objet distant de l'objectif de 50 mètres. Les longueurs focales de l'objectif et de l'oculaire étant respectivement 1 mètre et 2 centimètres, quelle est la longueur qui sépare l'objectif de l'oculaire ?

55° Avec une lunette astronomique dont l'oculaire a un diamètre de 1 centimètre et l'objectif une distance focale de 50 centimètres, quelle est la fraction du diamètre du Soleil qui est visible ?

56° L'oculaire d'une lunette astronomique ayant une distance focale de 1 centimètre, on dirige la lunette astronomique vers un objet très éloigné, puis on donne à l'oculaire deux positions différentes ; dans l'une, l'image est définitive et virtuelle et à 20 centimètres de l'oculaire ; dans l'autre, elle est réelle et à la même distance. Quel est le déplacement de l'oculaire de l'une à l'autre de ces positions ?

57° La distance focale de l'objectif d'un microscope est $\frac{1}{2}$ centimètre, la distance focale de l'oculaire est 1 centimètre. La distance minimum de la vision distincte de l'observateur étant 12 centimètres, quelle doit être la distance entre l'objectif et l'oculaire quand l'objet est à 5,2 millimètres de l'objectif ?

58° Calculer la puissance d'un microscope dont l'objectif a une distance focale de 2 millimètres, l'oculaire a une distance focale de 2 centimètres, la distance de l'objectif à l'oculaire est 20 centimètres. Calculer ensuite le grossissement pour une distance minimum de la vision distincte égale à 20 centimètres.

59° Quel est l'angle, exprimé en radians, puis en subdivisions du degré, sous lequel une longueur de $\frac{1}{200}$ de millimètre est vue dans un microscope d'une puissance de 2500 dioptries ?

60° Trouver le grossissement d'un télescope pour un objet placé à 51 mètres et une vue accommodée à 25 centimètres, l'œil se trouvant au foyer de l'oculaire. Distance focale du miroir concave $F = 1$ mètre ; distance focale de l'oculaire $f = 1$ centimètre.

61° Le rayon de base de la partie efficace du miroir concave d'un télescope est de 4 cm., et le rayon du cercle oculaire est $0^{mm},3$. Sachant que la distance focale du miroir concave est 1 m., calculer la distance focale f de l'oculaire.

ONDES LUMINEUSES

62° Quelle est, sur un rayon lumineux, la longueur sur laquelle sont réparties les vibrations lumineuses d'une étincelle qui a duré un millionième de seconde ?

63° Dans l'expérience fondamentale des interférences lumineuses, la distance des deux fentes étant 2 millimètres et, la distance à l'écran du milieu de leur intervalle, comptée sur la perpendiculaire à la ligne des deux fentes étant 2 mètres, quel est l'écartement de deux franges brillantes consécutives dans une lumière dont la longueur d'ondulation est $0^{\mu},53$?

64° Le pouvoir séparateur d'une lunette étant pris égal à $\frac{\lambda}{d}$, λ longueur d'onde de la lumière incidente, d diamètre de l'objectif, calculer en secondes le pouvoir séparateur d'une lunette, dont l'objectif a 10 centimètres de diamètre, pour une lumière dont la longueur d'onde est égale à $\frac{1}{2000}$ de millimètre.

65° Un réseau de 200 traits par millimètre reçoit normalement un faisceau de lumière blanche. Calculer les déviations qui correspondent pour les deux premiers spectres à la longueur d'ondulation $0^{\mu},8$.

On reçoit les rayons réfractés sur une lentille convergente de 50 centimètres de distance focale, déterminer les largeurs des deux premiers spectres. Rouge extrême $0^{\mu},8$; violet extrême $0^{\mu},4$.

66° La raie verte de l'hydrogène dans le spectre d'une étoile est déplacée vers le rouge, relativement à la même raie du spectre d'un tube à hydrogène. Le déplacement est égal à $\frac{1}{8}$ de la distance qui sépare les deux raies du sodium,

vues dans le même spectroscope. Calculer; d'après ce déplacement, la vitesse avec laquelle l'étoile s'éloigne de la terre.

67° Avec une lunette dont l'objectif a 6 centimètres de diamètre, on sépare sur une mire à 500 mètres deux traits parallèles distants de 5 millimètres. Calculer le pouvoir séparateur de la lunette.

ÉLECTRICITÉ STATIQUE

CHARGES, POTENTIELS, CAPACITÉS

1° Deux petites sphères ont des charges électriques + 12 et — 8. Avec quelle force s'attirent-elles à une distance de 2 centimètres?

2° Une petite boule électrisée est mise en contact avec une boule égale à l'état neutre, puis on les sépare. A la distance de 10 centimètres, elle exercent l'une sur l'autre une répulsion de 9 dynes. Quelle était la charge primitive de la boule électrisée?

3° Deux petites sphères sont distantes de 5 centimètres; l'une d'elles a une charge de 40 unités; quelle doit être la charge de l'autre pour qu'il s'exerce entre elles une répulsion égale au poids de 5 milligrammes?

4° Quelle charge m faut-il donner à une sphère de 3 centimètres de diamètre pour que la densité superficielle soit 7?

5° Une sphère d'un rayon de 14 centimètres est électrisée, et sa densité est 10. Quel est son potentiel?

6° Deux sphères, ayant l'une 1 centimètre et l'autre 2 centimètres de rayon, ont été reliées un instant par un long fil et sont au même potentiel 40. La force de répulsion qui s'exerce actuellement entre elles est 4 dynes; quelle est leur distance?

7° Deux sphères conductrices électrisées, ayant pour rayons 5 millimètres et 1 centimètre, ont été reliées par un fil long et fin de capacité négligeable. La communication ayant été interceptée, les centres des deux sphères ont été placés à 5 centimètres: on a observé une répulsion de 8 dynes; quel était le potentiel commun des deux sphères?

8° Deux sphères, chargées chacune de un coulomb d'électricité positive, sont distantes de 10km. Quelle est leur force d'attraction?

9° Une sphère conductrice de 5 centimètres de rayon a un potentiel 5; une autre sphère de 10 centimètres de rayon a un potentiel 10; on les réunit par un fil long et fin. Que devient le potentiel commun?

10° Une sphère électrisée de 14 centimètres de diamètre a une densité 10. Quelle est la force exercée par cette charge sur un point extérieur très voisin de la surface?

11° Deux sphères isolées, dont les rayons sont entre eux comme 7 et 11, contiennent la même quantité d'électricité; dans quel rapport sont leurs densités? Dans quel rapport seront les densités si les deux sphères précédentes sont mises en communication lointaine?

12° Quelle charge faut-il donner à une capacité de 100 microfarads pour élever son potentiel de 50 volts?

ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

13° Calculer directement le travail qu'une masse électrique $+q$ occupant une petite sphère conductrice S, produit en repoussant une masse d'électricité + 1 depuis la surface de la sphère jusqu'à l'infini.

14° Quelle est l'énergie dépensée pour donner à une sphère isolée de 30 centimètres de rayon une charge de 1000 unités électrostatiques?

15° Une sphère conductrice de 5 centimètres de rayon est au potentiel 5; une autre de 10 centimètres de rayon est au potentiel 10. Quelle est la somme de

leurs énergies quand elles sont indépendantes? Que devient cette énergie quand on les a reliées par un fil long et fin?

16° La capacité d'un conducteur est 700; à quel potentiel faut-il le charger pour que l'énergie de sa décharge soit équivalente à 1 calorie?

17° Un conducteur de capacité 150 est chargé au potentiel 100. Quelle vitesse devrait avoir un projectile de 400 grammes pour avoir la même énergie?

CONDENSATEURS

18° Une sphère conductrice de 50 centimètres de rayon est électrisée au potentiel 200. On lui fait partager sa charge avec le collecteur d'une bouteille de Leyde (condenseur au sol) de capacité inconnue. Le potentiel tombe à 20. Quelle est la capacité c de la bouteille de Leyde?

19° Un condensateur de capacité 10 est porté au potentiel 30. Quelle est sa charge, quel travail a-t-on dépensé pour le charger?

20° Soit un condensateur de capacité 10 000 chargé au potentiel 14; on le décharge partiellement; le potentiel tombe à 5. Quelle est la chaleur produite par la décharge si toute l'énergie est convertie en chaleur?

21° Une bouteille de Leyde partage sa charge avec deux autres de même capacité. Quelle sera l'énergie de la charge d'une bouteille après ce partage?

22° Soit un condensateur dont la capacité est 8000; on le décharge à travers un fil métallique dont la capacité calorifique est égale à 0,0006; ce fil est porté de 10° à 510°. Quelle était la différence de potentiel v des armatures avant la décharge en supposant que toute la chaleur s'est dégagée dans le fil?

23° Quatre bouteilles de Leyde ont chacune 3 décimètres carrés de surface, 2mm,5 d'épaisseur de verre. Quelle est la capacité de la batterie qu'on formerait avec ces bouteilles? Pouvoir inducteur du verre : 3.

24° Six bouteilles de Leyde, disposées en batterie, présentent chacune une surface de 450 cm². Le verre est épais de 2 mm. et a un pouvoir inducteur égal à 3. Quelle charge peut-on donner à la batterie avec une source dont les deux collecteurs ont une différence de potentiel égale à 300?

25° On construit un condensateur avec des feuilles d'étain et du papier paraffiné de $\frac{1}{3}$ de millimètre d'épaisseur, le papier paraffiné ayant un pouvoir inducteur spécifique égal à 2. Quelle surface S devra-t-on donner au condensateur pour que sa capacité soit égale à celle d'une sphère de 1500 mètres de rayon?

26° Quelle est la densité électrique à la surface d'une sphère de 5 centimètres de rayon si le potentiel de la sphère est 20 000 volts?

27° On forme une batterie de 6 bouteilles de Leyde; chacune des bouteilles présente une surface de 450 centimètres carrés; le verre a une épaisseur de 2 millimètres et un pouvoir inducteur spécifique égal à 3. Quel sera en microfarads la capacité de la batterie, et quelle sera sa charge en coulombs avec une source dont les deux collecteurs ont une différence de potentiel égale à 300 en unités électrostatiques?

28° Quel est le rayon d'une sphère dont la capacité est de 1 microfarad?

29° La capacité du conducteur est $\frac{1}{10}$ de microfarad; quel potentiel en volts faut-il lui donner pour que son énergie soit équivalente à 1 calorie?

30° Un condensateur de 10 microfarads est chargé sous une différence de potentiel de 500 volts. Quelle est son énergie?

31° Un petit condensateur est formé de deux feuilles d'étain ayant chacune 4 centimètres de largeur et 11 centimètres de longueur, séparées par du mica de pouvoir inducteur spécifique 6 et d'une épaisseur de $\frac{1}{10}$ de millimètre. Quelle est la capacité du condensateur en unités électrostatiques, puis en microfarads?

32° Quelle surface devrait avoir chacune des armatures d'un condensateur formé des mêmes matières que le précédent pour avoir une capacité d'un microfarad?

33° Un condensateur dont la capacité est d'un microfarad est mis en communication par l'une de ses armatures avec le sol, et par l'autre avec une machine de Ramsdem au potentiel de 9000 volts. On décharge le condensateur à travers un fil métallique ayant une longueur de deux mètres, un diamètre de $\frac{1}{5}$ de millimètre, une densité 7 et une chaleur spécifique 0,09. Quelle sera l'élévation θ de température du fil en admettant que toute l'énergie de la décharge s'est transformée en chaleur dans le fil?

34° Une machine électrique fait 8 tours par seconde. Il lui faut 20 tours pour établir une différence de potentiel de 10000 volts entre les deux armatures d'une batterie dont la capacité est 1 microfarad. Quel est le travail converti en énergie électrique en une seconde par cette machine?

MAGNÉTISME

1° Quelle est la force qui s'exerce entre deux pôles de masses magnétiques 32 et 40 à une distance de 10 centimètres?

2° Un pôle magnétique de masse 90 attire un autre pôle situé à 2 centimètres avec une force égale au poids d'un gramme. Quelle est la masse du deuxième pôle?

3° Quel est le nombre d'unités magnétiques d'un pôle qui est poussé par une force de 9 dynes, quand on le place dans un champ magnétique d'intensité 0,18?

4° Un aimant dont les pôles valent 300 unités est placé dans un champ magnétique uniforme où l'intensité est 0,466. Quelles sont les forces qui agissent sur ces pôles?

5° Quel est le couple nécessaire pour maintenir, normalement aux forces magnétiques d'un champ de 5 gauss, un aimant droit d'une longueur de 20 centimètres et d'une masse magnétique aux pôles égale à 10 unités magnétiques?

6° Un aimant rectiligne a une longueur de 10 centimètres entre ses pôles, une section de $0^{cm^2},5$; son moment magnétique est 1000. Quelle est son intensité d'aimantation A? Quelle est la masse magnétique de ses pôles?

7° En un lieu où la composante horizontale de l'intensité magnétique est 0,196, quelle est la force du couple directeur qui agit sur une aiguille de déclinaison dont les masses magnétiques sont égales à 100, lorsque l'axe magnétique de cette aiguille fait un angle de 30° avec le méridien magnétique?

8° Une aiguille de déclinaison fait 50 oscillations par minute en un lieu où l'angle d'inclinaison est 65°, et 47 oscillations par minute en un lieu où l'angle d'inclinaison est 70°. Comparer les valeurs T et T' de la force magnétique aux deux stations.

9° L'angle d'inclinaison étant 65° et la force qui agit sur l'un des pôles d'une aiguille aimantée étant égale à 0,465 dyne, quel poids faut-il appliquer à 2 centimètres de l'aiguille aimantée soutenue en son milieu pour la rendre horizontale, la distance des pôles étant 10 centimètres?

10° Quel est l'angle avec l'horizontale de l'aiguille d'une boussole d'inclinaison lorsque le plan vertical dans lequel elle est mobile fait un angle de 30° avec le méridien magnétique?

ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE

PILES, RÉSISTANCES

1° Quelle quantité d'électricité prend une sphère de 50 centimètres de rayon reliée au pôle positif d'un élément de pile, quand l'autre pôle communique avec le sol, la différence de potentiel aux deux pôles étant 1,8 volt?

2° On joint les deux pôles d'un élément de pile aux deux systèmes de secteurs d'un électromètre à quadrants, et on obtient une déviation de 61 divisions de la règle divisée. Un élément Daniell produisant une déviation de 45 divisions et ayant une différence de potentiel égale à $1^{v}08$, quelle est la force électromotrice de l'élément considéré?

3° Quelle est la résistance, en ohms, d'une ligne de 400 kilomètres; le fil est un fil de cuivre de 2 mm. de diamètre, dont la résistance spécifique est 1,58 microhms à 0°. Quelle sera la variation de résistance de cette ligne pour une différence de température de 20°: coefficient de température 0,004 par degré?

4° Quelle section doit-on donner à un fil de cuivre de 5 km. de longueur pour qu'il ait une résistance de 10 ohms à 50°? La résistance spécifique du cuivre à 0° est 1,5 microhms : coefficient de température 0,004 par degré.

5° Les deux armatures d'un condensateur à air, d'un mètre carré de surface et distantes de 2 millimètres, sont mises en communication avec les deux pôles d'une pile de 1000 éléments Daniell. Calculer sa charge. La différence de potentiel aux deux pôles d'un élément vaut 0,00374 en unités électrostatiques.

6° La résistance d'un fil d'argent de $1^{m}03$ de longueur et de 1 millimètre de diamètre est 0,02 ohm. Quelle est la résistance spécifique ρ de l'argent?

7° Un fil de 500 mètres de longueur et de $0^{mm}76$ de diamètre a une résistance de 20 ohms. Quelle est sa résistance spécifique?

8° La résistance spécifique du platine est 9. Quelle sera la résistance d'un fil de platine de 2 m. de long pesant 2 décigr.? Densité du platine, 22.

9° Un fil de cuivre a 10 mètres de longueur et pèse 20 grammes. Sa résistance en ohms est 0,715. La densité du cuivre étant 8,8, quelle est sa résistance spécifique?

10° Quelle longueur l de fil de platine de 1 millimètre de diamètre faut-il pour une résistance d'un ohm? La résistance spécifique du platine est 9.

LOI D'OHM

11° Une pile de 8 éléments ayant chacun 1,8 volt de force électromotrice et 0,4 ohm de résistance intérieure, est opposée à une autre de six éléments ayant 1,1 volt de force électromotrice et 0,3 ohm de résistance. Quelle est l'intensité du courant?

12° Quelle est en volts la chute de potentiel sur un fil conducteur de 3 km. de longueur et de 60 mm² de section qui transmet un courant de 10 ampères? Résistance spécifique du fil 1,6 microhm par cm.

13° Une pile a 120 éléments; elle est formée de deux groupes associés en quantité; chacun de ces groupes renferme 60 éléments en série. Quelle est la résistance intérieure de la pile, la résistance d'un élément étant 1,5 ohm?

14° La différence de potentiel aux deux pôles d'une machine de Holtz est de 50000 volts, l'intensité du courant est 0,1 milliampère. Quelle est la résistance intérieure de la machine, la résistance extérieure étant négligeable?

15° La différence de potentiel aux deux pôles d'une pile à circuit ouvert est 15 volts; on réunit les pôles par un fil conducteur; on a un courant de deux ampères, et la différence de potentiel entre les pôles devient 10 volts. Trouver la résistance r du fil et la résistance R de la pile.

16° La différence de potentiel aux deux pôles d'un élément de pile en circuit ouvert est 1[illegible] volt; on ferme le circuit par une résistance extérieure de 10 ohms, et on observe entre les deux pôles une différence de potentiel de $1^{v}75$. Calculer la résistance R de l'élément de pile.

17° Les pôles d'une pile de 10 éléments sont réunis par un fil homogène de 16 mètres de longueur ayant une résistance de 0,5 ohm par mètre. La différence de potentiel aux deux pôles de chaque élément de pile est $1^{v}8$, et sa résistance 0,4 ohm. Quelle sera sur le fil la distance de deux points offrant une différence de potentiel de 1 volt?

18° Un élément Daniell de force électromotrice $1^{v}08$ et un élément Bunsen de force électromotrice $1^{v}8$, sont opposés dans un circuit : le courant a une intensité de 0,4 ampère. Quelle serait l'intensité I si les éléments s'ajoutaient?

19° Un circuit, dont la résistance extérieure est 1 ohm, est traversé par le courant de 5 éléments égaux disposés en série. Quelle est l'intensité du courant? Résistance d'un élément 0,4 ohm, différence de potentiel 1,8 volt.

Quelle est l'intensité si les éléments sont disposés en quantité?

20° Un circuit renferme 5 éléments semblables, un galvanomètre d'une résistance de 0,5 ohm et un conducteur interpolaire d'une résistance de 0,5 ohm. Les 5 éléments étant en série, l'intensité du courant est 1,5 ampère; s'ils sont en quantité, l'intensité est 1,25 ampère. Calculer la différence de potentiel E et la résistance intérieure R d'un élément?

21° Le courant d'une pile constante est de 10 ampères quand il traverse un circuit extérieur de 20 ohms, de 8 ampères avec une résistance de 40 ohms, et de 9 ampères à travers un fil de résistance inconnue. Trouver la résistance R de la pile et la résistance x du fil.

22° Quel est le courant maximum qu'on peut obtenir avec 40 éléments offrant chacun une différence de potentiel de 1^{v}6, et dont la résistance intérieure est 0$^{\omega}$,3, la résistance extérieure étant 3 ohms. Comment faut-il grouper les éléments?

COURANTS DÉRIVÉS

23° Trois conducteurs en dérivation relient deux points A et B d'un circuit. Leurs résistances respectives sont 3 ohms, 5 ohms et 9 ohms. Quelle est la résistance r, équivalente à l'ensemble des trois conducteurs?

24° Dans un pont de Wheatstone on a pris comme résistances fixes 20 et 100 ohms; quelle sera la résistance d'un fil occupant la branche contiguë à 20 ohms si la résistance de la boîte graduée qui établit l'équilibre dans la 4e branche est 252 ohms?

25° Une bobine marquée 1 ohm a réellement une résistance égale à 1,005 ohm. Quelle longueur l d'un fil ayant une résistance de 20 ohms par mètre devra-t-on placer entre les bornes de la bobine pour avoir un ohm exact?

26° Un courant se bifurque en A et B en deux dérivations de résistances 30 ohms et 15 ohms. La différence de potentiel entre A et B est de 45 volts. Quel est le courant qui passe dans chaque dérivation, quel est le courant total I. Quelle est la résistance R équivalente à l'ensemble des deux dérivations?

27° Trois fils aboutissant aux deux points A et B d'un circuit ont pour résistances respectives, 1, 2 et 3 ohms. Quelle est l'insensité I du courant total qui passe entre A et B lorsque la différence de potentiel entre ces deux points est 2 volts?

28° Les pôles d'une pile sont réunis à 2 fils formant un arc double; l'un d'une résistance de 50 ohms, l'autre d'une résistance de 100 ohms. La force électromotrice de la pile étant 6 volts et sa résistance 10 ohms, trouver l'intensité du courant principal et des courants dérivés?

EFFETS CALORIFIQUES DES COURANTS

29° Calculer l'énergie développée par heure dans un conducteur ayant une résistance de 32 ohms et offrant une différence de potentiel de 40 volts.

30° Combien de chevaux-vapeur faut-il pour maintenir un courant de douze ampères dans une résistance de 40 ohms?

31° On fait passer pendant 5 minutes un courant de 0,75 ampère dans une colonne de mercure dont la résistance est 0,47 ohm. Masse du mercure 20^{gr}25, chaleur spécifique du mercure 0,0322. En négligeant les pertes par rayonnement, à quelle température s'élèvera le mercure?

32° Un courant de 1,5 ampère passe pendant 15 minutes à travers un fil de 3 ohms de résistance plongé dans 300 grammes d'eau. Quelle sera l'élévation de température produite?

33° Les pôles d'une pile sont réunis à une spirale plongée dans un calorimètre qui contient 200 grammes d'eau. Un courant de deux ampères élève la tem-

pérature de l'eau de 2° en un quart d'heure. Quelle est la différence de potentiel aux deux extrémités de la spirale pendant le passage du courant?

34° On transmet, par un fil de cuivre, une puissance de 25 chevaux-vapeur sous 500 volts de différence de potentiel. Quelle doit être la section du fil pour que la transmission ait lieu à 1 kilomètre avec une de perte 10 % produite par la différence de potentiel le long du fil? Résistance spécifique du cuivre 1, 6 microhm par centimètre.

35° Sous quelle différence de potentiel doit circuler un courant de 5 ampères dans un conducteur, si la puissance absorbée par le conducteur est 60 watts?

36° Une lampe à incandescence de 16 bougies brûle dans un calorimètre qui contient un litre d'eau; elle échauffe cette eau de 2° en 5 minutes. Quelle puissance absorbe-t-elle par bougie?

37° Un courant traverse un fil de 10 ohms de résistance plongé dans un calorimètre. On fait circuler dans ce calorimètre 20 centimètres cubes d'eau par minute, cette eau présente à sa sortie 8° de plus qu'à l'entrée. Quelle est l'intensité du courant?

38° Les deux pôles d'un élément Bunsen de force électromotrice 1v,8 et de résistance intérieure 0,7 sont réunis successivement : 1° par un fil de cuivre gros et court de résistance négligeable; 2° par un fil fin de platine de 5 ohms de résistance. Quel est le rapport des quantités de chaleur dégagées dans chaque cas dans l'élément?

39° Deux fils d'argent et de platine de même longueur et de même diamètre se suivent dans un circuit. Quel est le rapport des quantités de chaleur dégagées dans chacun d'eux? Résistance spécifique du platine 9, résistance spécifique de l'argent $\frac{3}{2}$ (en microhms).

40° Si les deux fils précédents sont placés en arc double entre deux points du circuit, quel sera le nouveau rapport des quantités de chaleur dégagées dans le même temps dans chacun d'eux?

41° Un fil de plomb est employé comme *fil de sûreté* (coupe-circuit); quel diamètre faut-il lui donner pour que le courant qui le traverse ne puisse pas dépasser 10 ampères. Nous prendrons 3,2 microhms pour résistance spécifique du plomb de 0° à 330°. Nous admettons, *par approximation*, que le rayonnement du métal chaud a lieu conformément à la loi de Newton et que la fraction de calorie rayonnée par degré et par centimètre carré est $\frac{1}{4000}$.

EFFETS CHIMIQUES DES COURANTS

42° Quelle serait l'intensité d'un courant qui décomposerait 1 milligramme d'eau en une seconde?

43° Un courant qui passe dans un voltamètre à eau acidulée par l'acide sulfurique dégage en 5 minutes 50 centimètres cubes d'hydrogène. Calculer l'intensité du courant, sachant qu'un coulomb met en liberté $\frac{1}{96600}$ de gramme d'hydrogène. La pression barométrique est 750 millim., la température 20°. Tension maximum de la vapeur d'eau à 20° : 17mm39.

44° On fait passer un courant de 5 ampères dans un voltamètre à eau acidulée, combien faut-il de temps pour obtenir à la cathode un litre d'hydrogène?

45° Combien peut-on décomposer d'eau en une heure avec un cheval vapeur? Force électromotrice de polarisation de l'eau : 1,5 volt.

46° Caculer le volume d'hydrogène dégagé par minute par un courant d'un ampère dans un voltamètre à eau acidulée (volume à 0° et 76).

47° Quelle est l'intensité du courant qui dépose 1 gr. d'argent en 5 minutes?

48° Combien de temps faut-il à un courant d'un ampère pour déposer 1 gramme d'argent?

49° Quelle est la masse d'argent déposée en une minute d'une solution de nitrate d'argent, le courant étant de deux ampères?

50° Une pile dépose en 2 heures 9gr540 d'argent d'une solution d'azotate d'argent. Quelle est l'intensité du courant en ampères ?

51° Une pile de cinq éléments Daniell associés en série est reliée à un voltamètre à sulfate de cuivre dans lequel 40 grammes de cuivre sont déposés en une heure. Combien y aura-t-il de cuivre déposé et de zinc dissous dans la pile dans le même temps ? Équivalent du cuivre, 31,5 ; équivalent du zinc, 33.

52° Quel poids de zinc faut-il dépenser pour produire pendant une heure un travail de 10 kilogrammètres : 1° avec un élément Bunsen de force électromotrice 1v,9 ; 2° avec un élément Daniell de force électromotrice 1v,1 ?

53° Deux plaques de cuivre de même surface sont plongées parallèlement et en regard dans une solution de sulfate de cuivre. Quand les plaques sont distantes de 20 centimètres, l'intensité du courant est la même que lorsqu'elles sont distantes de 17,5 centimètres, avec une résistance additionnelle de 10 ohms dans le circuit. Quelle est la résistance spécifique ρ du liquide ? La surface plongée pour chacune des plaques est 25 centimètres carrés.

54° Combien faut-il dépenser de coulombs pour argenter une médaille d'une surface de 25cm², pour un dépôt d'une épaisseur de 0mm02 ? Densité de l'argent, 10,5; équivalent de l'argent 108, valence de l'argent 1.

55° La quantité d'électricité emmagasinée par kilogramme de plaqué dans un accumulateur étant 50 mille coulombs et la force électromotrice d'un accumulateur étant 2 volts, calculer le poids de plaques nécessaire pour fournir une puissance de 500 kilowatts pendant 4 heures. On arrête la décharge quand la moitié de l'énergie accumulée a été restituée.

GALVANOMÈTRES

56° Quelle résistance r_1 faut-il placer en dérivation aux bornes d'un galvanomètre de 792 ohms de résistance pour reduire sa sensibilité à $\frac{1}{100}$?

57° En traversant un voltamètre à azotate d'argent, un courant dépose en une heure 6 grammes d'argent, une boussole des tangentes intercalée dans le même circuit donne une déviation de 45° ; quelle est la constante K de la boussole ?

58° Une boussole des tangentes dont la résistance est 100 ohms est parcourue par un courant qui produit une déviation de 45°. Quelle sera la nouvelle déviation si la boussole est munie d'une dérivation qui réduit sa sensibilité à $\frac{1}{100}$, la résistance de la pile étant 10 ohms ?

59° La résistance d'un circuit étant 4 ohms, la déviation d'une boussole faisant partie du circuit est de 60° : on intercale un fil de platine dans le circuit; la déviation tombe à 45°. Quelle est la résistance x du fil de platine ?

60° Un courant de 0,85 ampère parcourt le cadre d'une boussole des tangentes sur laquelle sont enroulés trois tours de fil. Le cadre ayant 30 centimètres de diamètre, et la composante horizontale du magnétisme terrestre au lieu de l'observation étant 0,196, quel sera l'angle de déviation ?

61° Une boussole des tangentes donne une déviation de 30° à Hambourg où $H = 0,182$; quelle déviation α donnera-t-elle à Trieste pour le même courant ? A Trieste, $H' = 0,220$.

62° Le circuit d'une pile renferme une résistance de 200 ohms et un galvanomètre de résistance inconnue. Ce galvanomètre marque une déviation de 2° quand on a inséré une dérivation de 10 ohms entre ses bornes. Cette dérivation étant supprimée, il faut remplacer la résistance de 200 ohms par 2200 ohms pour ramener la déviation à 2°. Quelle est la résistance r du galvanomètre ?

ÉLECTROAIMANTS

63° Une bobine a 50 centimètres de longueur et 2 centimètres de diamètre ; elle est couverte de 300 tours de fil, on y fait passer un courant de 2 ampères. Quelle est la valeur du flux de force intérieur ?

64° Dans quel rapport croît le moment magnétique d'un électroaimant si l'on porte le nombre des spires de 200 à 750, l'intensité du courant ne variant pas ?

65° Le courant d'une pile de 12 éléments Daniell disposés en série traverse un fil télégraphique de 120 ohms. Quelle est l'intensité ? Résistance intérieure d'un élément, 0,6 ohm : force électromotrice, 1,1 volt.

66° La résistance spécifique de la gutta-percha étant 2.10^{14}, calculer le nombre de coulombs qui traverseront en un siècle une lame de gutta-percha de 1 centimètre d'épaisseur et de 1 mètre carré de surface dont les deux faces sont recouvertes d'étain et reliées aux deux pôles d'une pile de 100 éléments Daniell.

67° On a 54 éléments de force électromotrice $1^v,1$ et d'une résistance de 2 ohms, comment faut-il les grouper pour avoir le courant maximum dans une ligne télégraphique de 12 ohms ?

68° Quelle est l'intensité en gauss, d'un champ magnétique à l'intérieur d'un solénoïde de grande longueur et de faible diamètre formé d'une seule couche de fil, de 5 spires par centimètre, lorsque le courant qui traverse le solénoïde est de 10 ampères ?

69° Le noyau et l'armature d'un électroaimant en fer à cheval, formant un circuit magnétique fermé, ont une section uniforme de 15 centimètres carrés, leur longueur moyenne est 50 cm. Combien faudra-t-il d'ampères tours pour produire un flux total de 225000 unités ? Le coefficient de perméabilité du fer est 525.

70° Un anneau de fer de 10 centimètres carrés de section, de 60 cm. de longueur moyenne, a été interrompu après section, par un écartement de 5 mm. des deux bords de la coupure. La perméabilité du fer est 1200 ; quelle est la résistance magnétique totale de l'anneau et de l'air interposé dans l'entrefer ?

71° Un fil de ligne a une résistance de 100 ohms entre deux stations S et S'. En S il est relié à une pile d'une force électromotrice de 50 volts et d'une résistance intérieure de 10 ohms : en S' il se termine par un récepteur d'une résistance de 20 ohms. Au milieu d'un fil, un accident a établi une communication imparfaite avec le sol d'une résistance de 10 ohms. Quelle était l'intensité du courant I avant l'accident ? Quelle sera l'intensité I_1 du courant entre la pile et le lieu de l'accident ? Quelle sera l'intensité i_1 du courant auprès du récepteur ?

INDUCTION

72° Une spire circulaire de 30 centimètres de diamètre est placée verticalement dans un champ magnétique uniforme dont la force est égale à 0,2 : le cadre étant d'abord perpendiculaire aux lignes de force, on le fait tourner brusquement de 90°. Quelle est la quantité d'électricité mise en circulation dans la spire, la résistance de cette spire et du galvanomètre qui complète le circuit étant 2 ohms ?

73° Un cadre est placé verticalement dans un champ magnétique uniforme dont la force est horizontale ; le cadre étant d'abord perpendiculaire aux lignes de force, on le fait tourner brusquement de 90° ; un galvanomètre à réflexion placé dans le circuit indique une impulsion de 52 minutes.

On recommence la même opération dans un autre champ magnétique uniforme où la force est encore horizontale et égale à 0.196, on obtient une impulsion de 36 minutes.

Les impulsions étant proportionnelles aux quantités d'électricité, quelle est la force du premier champ magnétique ?

74° L'un des fils d'une bobine cylindrique à 2 fils communique avec les deux pôles d'une pile et l'autre fil avec un galvanomètre. En ouvrant le circuit de la pile, le galvanomètre accuse une impulsion de 14 minutes.

On recommence l'opération en plaçant dans la bobine un noyau de fer de même diamètre ; le courant induit donne une impulsion de 5°10'.

Quel est le coefficient μ de perméabilité magnétique du fer ?

75° Une bobine de 50 centimètres de longueur et de 50 centimètres carrés de section, est recouverte d'une couche de fil ayant 200 tours. Elle est parcourue par un courant de 2 ampères. Une spirale de 10 tours de fil entoure la partie

moyenne de la bobine. Calculer la force électromotrice e d'induction produite dans la spirale quand on la sort du champ magnétique en $0^{sec},25$.

Si, pour la valeur de la force du champ magnétique dans la bobine, le coefficient de perméabilité du fer est 1000, calculer la force électromotrice développée par l'éloignement de la spirale quand on a introduit un noyau de fer dans la bobine. Calculer aussi la quantité d'électricité induite si la résistance de la spirale est 2 ohms.

76° Une bobine de 1000 spires enveloppe un flux magnétique de 100 mille unités, on la fait sortir du champ magnétique en $0^{sec},1$. Quelle est, en volts, la force électromotrice induite et quelle sera l'énergie dépensée pour faire sortir la bobine du champ magnétique, le circuit de la bobine étant fermé et la résistance de son circuit étant 10 ohms ?

MACHINES D'INDUCTION

77° Dans une machine de Gramme en série, la résistance de l'armature est 0,20 ohm, la résistance de l'électroaimant 0,60 ohm. La résistance extérieure étant 15 ohms, quelle doit être la force électromotrice pour que l'intensité du courant soit 10 ampères?

78° Quel est le travail mécanique nécessaire pour entretenir le mouvement d'une machine de Gramme de 70 volts et 30 ampères ?

79° Une machine de Gramme, à excitation indépendante, donne un courant de 2 ampères avec 800 tours par seconde. Quel devra être le nombre de tours pour fournir un courant de 6 ampères dans le même circuit ?

80° Un ampèremètre placé dans le circuit d'une machine de Gramme marque 6 ampères; un voltmètre relié aux balais à circuit fermé marque 10^v. La résistance intérieure de la machine étant 2 ohms, quelle est la force électromotrice?

81° Une machine de Gramme, à excitation indépendante, a une résistance intérieure de 0,01 ohm et une force électromotrice de 90 volts. Quelle intensité peut-elle produire *théoriquement* en court circuit ?

82° Une machine de Gramme actionnée par un moteur de 4 chevaux-vapeur fournit 30 ampères avec une différence de potentiel de 70 volts aux balais en circuit fermé. Quelle est la fraction utilisable du travail du moteur?

83° Un moteur de 4 chevaux-vapeur fait tourner l'anneau d'une machine dynamo-électrique. La résistance intérieure étant 0,025 ohm, la résistance extérieure 0.20, l'intensité du courant 100 ampères, calculer : 1° la fraction du travail moteur convertie en énergie électrique; 2° la fraction du travail moteur convertie en énergie utilisable ?

84° La résistance de l'armature d'une machine de Gramme à excitation indépendante est 0,1 ohm; ses pôles sont réunis à une résistance de 100 ohms, puis à une résistance de 5 ohms. Quel est le rapport des quantités de chaleur dégagées dans les deux cas dans l'armature en supposant que la machine tourne avec la même vitesse?

85° La résistance de l'armature d'une machine de Gramme à excitation indépendante est 0,4 ohm. A circuit ouvert, il faut 0,01 cheval-vapeur pour faire faire à l'anneau n tours par seconde; à circuit fermé, la résistance du circuit extérieur étant 3,6 ohms, il faut 0,1 cheval-vapeur. Combien faudra-t-il de chevaux-vapeur pour avoir la même vitesse de rotation quand la résistance extérieure est 0,1 ohm?

MOTEURS ÉLECTRIQUES

86° Une génératrice et une réceptrice ont toutes les deux 10 ohms de résistance; le conducteur qui les réunit a 2 ohms de résistance. A la vitesse de régime, la génératrice présentant une force électromotrice de 200 volts, et la réceptrice une force électromotrice de 134 volts, quel est le rendement de la réceptrice?

87° Un circuit renferme une génératrice et une réceptrice. L'énergie électrique

développée par la génératrice absorbe 20 chevaux-vapeur : sa force électromotrice est triple de celle de la réceptrice. Quelle est la puissance de la réceptrice, quelle est la chaleur dégagée en une seconde dans le circuit entier?

88° On installe à 10 kilomètres d'une génératrice fonctionnant à 150 volts un récepteur qui doit fournir à 130 volts un travail d'un cheval-vapeur : le rendement du récepteur est 0,90. Quel doit être le diamètre *d* du fil de cuivre qui relie les deux stations, le cuivre ayant une résistance spécifique 1,59?

Quel est le prix de revient de ce fil de cuivre, en supposant qu'il coûte 2 fr. 80 le kilo, et que sa densité est 8,8?

89° Quelle est la perte de travail, déterminée en une heure, par la résistance d'un câble de 10 ohms transportant un courant de 15 ampères et quelle est la dépense correspondante si l'hectowatt-heure coûte 0 fr. 10?

90° Un tour est actionné par un moteur électrique. Le courant électrique qui circule dans le moteur a une intensité de 10 ampères, sous la tension de 110 volts. L'hectowatt-heure coûtant 0 fr. 10, quel est le prix de la force motrice ou du travail d'une heure?

91° On veut transporter une puissance de 50 kilowatts à 5 kilomètres (10 pour l'aller et le retour), en employant une source d'électricité qui donne 100 ampères avec un voltage de 500 volts. La perte d'énergie par la ligne étant de 20 %, quel est le poids du cuivre qui la constitue? Quel sera le poids de cuivre avec un courant de 20 ampères sous 2500 volts? Densité du cuivre, 8,8.

92° On fait passer dans l'induit d'une machine magnétoélectrique un courant de 30 ampères. L'induit, tournant avec une vitesse de 1200 tours par minute, développe un travail de 300 kilogrammètres par seconde. Quelle est la valeur de la force électromotrice développée dans l'induit pendant sa rotation? Quel est le moment du couple moteur?

ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE

93° Une lampe à arc reçoit 12 ampères, et ses charbons offrent une différence de potentiel de 45 volts. Quelle énergie consomme-t-elle?

94° Une lampe à incandescence traversée par un courant de 0,7 ampère présente à ses extrémités une différence de potentiel de 98 volts ; quelle est sa résistance R?

95° Une lampe à incandescence traversée par un courant de 0,75 ampère présente à ses extrémités une différence de potentiel de 60 volts. Quelle est la chaleur dégagée en une heure dans la lampe?

96° Combien faut-il d'accumulateurs disposés en série, de 2 volts de force électromotrice et de 0,01 ohm de résistance, pour faire fonctionner 20 lampes parallèles de 50 volts et de 0,7 ampère?

97° La force électromotrice d'une machine dynamo-électrique est 142,5 volts, et sa résistance intérieure 2 ohms. Combien peut-elle alimenter de lampes à incandescence disposées parallèlement, ayant chacune 40 ohms de résistance et devant être traversées par $\frac{3}{4}$ d'ampère?

98° Quelle sera la puissance minimum de la machine motrice qui fera tourner la dynamo précédente?

99° Une pile de 20 accumulateurs en série, de chacun 2 volts de force électromotrice, offre une résistance intérieure de 0,2 ohm. Elle alimente 60 lampes parallèles dont la résistance est 0,3 ohm : le fil conducteur extérieur ayant une résistance 0,04 ohm, quelle est la dépense de travail sur chaque lampe par seconde en kilogrammètres?

100° Une machine dynamo-électrique comprend dans son circuit 3 lampes à arc en série, ayant chacune une résistance de 1,8 ohm et des fils conducteurs d'une résistance de 1,2 ohm. La résistance intérieure de la machine est 0,6 ohm. Quelle est la fraction de l'énergie électrique produite qui est utilisée dans les lampes?

101° Sur deux fils conducteurs maintenus à une différence de potentiel de

110 volts on monte en dérivation 100 lampes à incandescence, ayant chacune une résistance de 120 ohms. Trouver l'intensité du courant qui passe dans chacune, l'intensité totale et la résistance pour l'ensemble des 100 lampes.

102° Une lampe à incandescence de 16 bougies fonctionne avec une différence de potentiel de 110 volts, sa résistance est 150 ohms. Quel est le prix de son éclairage par heure et par bougie, le kilowatt-heure coutant 0 fr. 50?

103° Deux conducteurs MM′ et PP′ sont maintenus à une différence de potentiel de 110 volts. Sur ces conducteurs on a intercalé en dérivation 15 lampes à incandescence, consommant chacune $1^w,5$ par bougie. Calculer : 1° la résistance r d'une lampe ; 2° l'intensité i du courant dans chaque lampe ; 3° l'intensité i_0 du courant dans les conducteurs AA′ et BB′ ; 4° l'énergie électrique consommée par les 15 lampes en une heure.

104° En admettant que le cheval-vapeur coûte 0,75 l'heure et qu'une machine électrique rende sous forme d'énergie utilisable 80 % de l'énergie mécanique qu'elle a reçue, quel est le prix de revient de l'hectowatt-heure et celui d'une lampe de 20 bougies par heure, sachant que cette lampe consomme un courant de 0,2 ampère sous 110 volts ?

COURANTS ALTERNATIFS

105° Un cadre a son plan perpendiculaire à l'aiguille d'inclinaison, c'est-à-dire à la force magnétique terrestre. Sur ce cadre sont enroulées 150 spires, chacune des spires a une surface de 10 décimètres carrés. Le cadre fait 5 tours par seconde autour d'un axe contenu dans son plan. Quelle est la force électromotrice maximum ou la différence de potentiel maximum aux extrémités du fil pour $\frac{1}{4}$ de tour? Calculer pour le même temps la quantité d'électricité induite. La valeur de la force magnétique terrestre est $T = 0,45$.

106° Combien de pôles faut-il donner à un alternateur à inducteur mobile pour que la fréquence des courants induits soit 50, l'inducteur faisant 300 tours par minute?

107° On dispose d'un transformateur dont le circuit primaire a 100 tours et le circuit secondaire 10 mille tours. La puissance du courant primaire alternatif étant de 55 kilowatts fournis par 110 volts efficaces et 500 ampères efficaces, quelles seront l'intensité efficace et la force électromotrice efficace du courant secondaire ?

108° Un éclateur donne des étincelles. Un miroir concave de 1 mètre de rayon de courbure, est placé à 1 mètre de l'éclateur et tourne avec une vitesse de 500 tours par seconde. Chaque étincelle consiste en étincelles partielles d'une fréquence de 1 million, et son image est décomposée en bandes lumineuses équidistantes. Calculer l'intervalle de deux bandes quand on les observe sur un écran normal au rayon réfléchi, à une distance de 1 mètre du miroir.

PHYSICIENS

CITÉS DANS L'OUVRAGE

Ampère, né près de Lyon, créateur de l'électrodynamique (1775-1836).

Andrews, physicien anglais (1813-1886).

Arago (François), astronome et physicien (1755-1859), né à Estagel (Pyrénées-Orientales).

Archimède de Syracuse (287-212 av. J.-C.).

Aristote, philosophe grec, précepteur d'Alexandre le Grand (384-322 av. J.-C.).

Atwood, professeur à Cambridge (1745-1807).

Becquerel (Antoine-César), physicien français (1788-1878)

Bernouilli (Daniel), né à Groningue (1700-1782).

Berthollet, chimiste français (1748-1822).

Biot, physicien français (1774-1862).

Black, professeur à Edimbourg (1728-1799).

Borda, né à Dax (1733-1799).

Boyle (R.), physicien et chimiste anglais (1627-1691).

Bréguet, mécanicien français (1747-1823).

Bunsen, professeur à Heidelberg (1811-1899).

Cagniard-Latour, né à Paris (1779-1859).

Carnot (Sadi) (1796-1832).

Charles, né à Beaugency (1746-1823).

Clausius, professeur à Bonn (1822-1888).

Colladon, physicien génevois (1802-1893).

Coulomb, né à Angoulême (1736-1806).

Daguerre, né à Cormeilles-en-Parisis (1788-1851).

Dalton, savant anglais (1766-1844).

Davy, chimiste anglais (1778-1827).

Descartes, né en Touraine (1596-1650).

Despretz, physicien français (1789-1863).

Du Fay, né à Paris (1698-1739).

Dulong, né à Rouen (1785-1838).

Faraday physicien anglais (1794-1867) (induction électrique).

Fahrenheit, né à Dantzig (1686-1740).

Fizeau, physicien français (1819-1896).

Foucault, physicien français (1819-1868).

Franklin (Benjamin), né à Boston, aux États Unis (1706-1790).

Fraunhofer, opticien bavarois (1787-1826).

Fresnel, né à Broglie (Eure) (1788-1827), créateur de l'optique physique.

Galilée, né à Pise (1564-1642), physicien et astronome.

Galvani, né à Bologne (1737-1798).

Gauss, mathématicien allemand (1777-1855).

Gay-Lussac, né à Saint-Léonard (Haute-Vienne) (1778-1850).

Gilbert, physicien anglais (1540-1603).

Gramme, né à Liége (1826-1901).

Gray, physicien anglais (mort en 1776).

Helmholtz, physicien et physiologiste allemand (1821-1894).

Héron, né vers 153 av. J.-C.

Hertz, de Hambourg (1857-1893), interférences électriques.

Hirn, de Colmar (1815-1890).

Hughes, physicien américain (1831-1900).

Huygens, savant hollandais (1629-1695).

Joule, né à Manchester (1818-1889).

Képler, né dans le Wurtemberg (1571-1630), un des fondateurs de l'astronomie moderne.

Kirchhoff, né à Kœnigsberg (1824-1887).

Laplace, mathématicien, né à Beaumont-en-Auge (1749-1827).

Lavoisier, né à Paris, fondateur de la chimie moderne (1743-1794).

Leibnitz, né à Leipzig (1646-1716).

Lenz, physicien russe (1804-1865).

Leslie, physicien écossais (1766-1832).

Mariotte (abbé), né en Bourgogne (1620-1684).

Maxwell, mathématicien anglais (1831-1879).

Mayer (Robert) (1814-1878), d'Heilbronn. (Principe de l'équivalence.)

Melloni, né à Parme (1801-1854).

Mersenne (le Père), né à Oizé, dans le Maine (1588-1648).

Monge, mathématicien, né à Beaune (1746-1818).

Montgolfier (Étienne et Joseph de), fabricants de papier à Annonay.

Morin, général d'artillerie (1795-188 0)

Morse, né à Charlestown, aux États-Unis (1791-1873).

Musschenbroek, né à Leyde (1692-1761).

Newton, mathématicien et physicien anglais (1642-1727).

Nicholson, savant anglais (1753-1815).

Niepce (Nicéphore), né à Chalon-sur-Saône (1765-1833).

Nollet (abbé) (1700-1770).

Œrsted, né à Copenhague (1777-1851).

Ohm, physicien allemand, né à Erlangen (1787-1854).

Otto de Guericke de Magdebourg (1602-1686).

Papin (Denis), né à Blois (1647-1714).

Pascal (Blaise), né à Clermont-Ferrand, géomètre et physicien (1623-1662).

Petit, né à Vesoul (1791-1820).

Planté, électricien français (1834-1900).

Pouillet, professeur à la Sorbonne (1791-1868).

Pythagore, né à Samos (570-472 av. J.-C.).

Ramsden, constructeur anglais, né à Halifax (1735-1800).

Réaumur, physicien et naturaliste, né à La Rochelle (1683-1757).

Regnault (Victor), physicien français (1810-1878).

Rœmer, astronome danois (1644-1710).

Ruhmkorff, constructeur à Paris (1803-1877).

Saussure (**de**), naturaliste génevois, (1740-1799).

Seebeck, physicien allemand (1770-1831).

Thomson (William), physicien anglais (1821-1908).

Torricelli, savant italien (1608-1647).

Volta, né à Côme (1744-1827), inventeur de la pile électrique.

Watt, ingénieur écossais (1736-1819).

Wheatstone, physicien anglais (1802-1875).

Wollaston, physicien anglais (1766-1828).

Young, physicien anglais (1773-1829).

TABLE DES MATIÈRES

NOTIONS DE MÉCANIQUE

Mouvements. — ***Mouvement uniforme.*** Mouvement rectiligne uniforme. — ***Mouvement varié.*** Définition de la vitesse. Mouvement rectiligne uniformément varié, mouvement uniformément accéléré, mouvement uniformément retardé. Mouvement périodique. Représentation graphique d'un mouvement. — ***Composition des mouvements.*** — ***Mouvement curviligne.*** Vitesse. Mouvement circulaire. Accélération. Mouvement circulaire uniforme. — ***Mouvement d'un système matériel*** I

Forces. — Forces. Représentation d'une force. Transport d'une force en un point de sa direction. Mesure statique des forces. — ***Composition des forces.*** Résultante et composantes. I. ***Composition des forces appliquées en un point.*** Composition de deux forces agissant suivant une même droite. Composition de deux forces concourantes, *parallélogramme des forces.* Composition de plusieurs forces concourantes, polygone des forces. *Théorème des projections.* Conditions d'équilibre. Décomposition d'une force. II. ***Composition des forces parallèles.*** Composition de deux forces parallèles de même sens. Composition de plusieurs forces parallèles de même sens. Composition de deux forces parallèles de sens contraires. Couples. Composition de forces parallèles quelconques. Décomposition d'une force en forces parallèles. Propositions relatives aux couples. — ***Réduction des forces appliquées à un corps solide.*** Conditions d'équilibre VIII

Principes de la mécanique. — I. ***Principe de l'inertie.*** — II. ***Principe de l'indépendance des effets des forces.*** *Forces successives.* Mouvement produit par une force constante. *Forces simultanées.* Proportionnalité des forces aux accélérations. Masse d'un corps, les masses sont proportionnelles aux poids. Unité de masse. Unité de force. Mesure dynamique d'une force. Densité. — III. ***Principe de l'égalité de l'action de la réaction*** XV

Travail. — ***Déplacement du point d'application dans la direction de la force.*** Travail d'une force constante. Kilogrammètre. Erg. Joule. Travail moteur, travail résistant. Travail d'une force variable. Puissance. — ***Déplacement du point d'application dans une direction différente de celle de la force.*** Force constante, déplacement rectiligne. Trajectoire curviligne. Force variable. — ***Équivalence de la force vive et du travail.*** Relation entre la force vive d'un mobile et le travail dépensé pour lui donner sa vitesse. Relation entre la force vive d'un mobile et le travail qu'il peut effectuer en perdant sa vitesse. Équivalence de la force vive et du travail. — ***Théorème général des forces vives.*** Théorème des forces vives pour un solide (solide en translation, solide en rotation, volant) XIX

Énergie. Énergie cinétique. Énergie potentielle. Exemples des deux énergies. Transformations des deux énergies XXIV

Machines. — Conservation du travail. — ***Poulie.*** — ***Levier.*** Leviers du premier genre, du second genre, du troisième genre. — ***Treuil.*** — ***Vis.*** — ***Frottements*** (glissement, roulement) XXVI

PHYSIQUE

Objet de la physique. — Modifications chimiques. Modifications physiques. Observation. Expérimentation. Branches de la physique. Lois physiques. Théories physiques. Hypothèses. Images. Divisions de la physique 1

PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES CORPS

Étendue. Divisibilité. Intervalles moléculaires. Élasticité. — ***États des Corps.*** État solide. Allongement d'une tige. État liquide. Compressibilité. État gazeux. États intermédiaires 4

Mesure des grandeurs. Grandeurs mesurables. — ***Mesure des longueurs.*** — Vernier. Cathétomètre. — ***Mesure des épaisseurs.*** Pied à coulisse. Sphéromètre. Palmer. — ***Mesure des surfaces.*** — ***Mesure des volumes.*** — ***Mesure des angles.*** Radians, degrés. Goniomètre. — ***Mesure des temps.*** 7

PESANTEUR

Pesanteur. Tous les corps sont pesants. Direction de la pesanteur. Fil à plomb. La direction de la pesanteur passe par le centre de la Terre. Poids d'un corps. Centre de gravité, détermination géométrique du centre de gravité, détermination expérimentale du centre de gravité. Équilibre d'un corps solide mobile autour d'un axe horizontal ou d'un point fixe. Équilibre d'un corps solide reposant sur un plan résistant horizontal 15

Lois de la chute des corps. — ***Vérifications expérimentales.*** I. Chute dans le vide. II. Loi des espaces, plan incliné de Galilée. Machine d'Atwood. Appareil Morin. III. Loi des vitesses. Accélération dans la machine d'Atwood. Calcul de g. Vérification de la proportionnalité des forces aux accélérations au moyen de la machine d'Atwood. — ***Chute dans l'air.*** Vitesse limite.... 20

Pendule. — Mouvement pendulaire. Durée de l'oscillation. Pendule composé, pendule synchrone, axe d'oscillation. Métronome. — ***Lois du pendule,*** isochronisme des petites oscillations, loi des accélérations, loi des longueurs. — ***Application du pendule aux horloges :*** moteur, régulateur. Balancier à ressort spiral. — ***Mesure de l'intensité de la pesanteur :*** mesure de la durée d'une oscillation, mesure de la longueur du pendule synchrone, résultats. Variations avec l'altitude. Variations avec la latitude. Longueur du pendule battant la seconde. — ***Potentiel.*** — ***Attraction universelle.*** La pesanteur est un cas particulier de l'attraction universelle. Variations de g à l'intérieur du globe terrestre. Démonstration de la rotation de la terre par le pendule. — ***Mouvements pendulaires.*** — ***Mouvement des projectiles.*** I. Vitesse initiale verticale. II. Vitesse initiale oblique. III. Vitesse initiale horizontale 29

Balance. — Mesure des masses et des poids. Description d'une balance. Fonctionnement d'une balance. Stabilité d'une balance. Justesse d'une balance, conditions de justesse. Méthodes de pesées : simple pesée, double pesée. Conditions de sensibilité d'une balance. Construction d'une balance. Balance de

précision. Balance à cavaliers. Balance hydrostatique. Balance de Roberval. Bascule. Balance romaine........ 49

Poids absolu d'un corps. — Invariabilité de la masse. Variabilité du poids, poids absolu........ 57

Densités. — Densités, poids spécifiques........ 57

Unités. — Anciennes unités. Relations entre les unités. — ***Système d'unités adopté en physique.*** Unités fondamentales : unité de longueur, unité de temps, unité de masse. Unités dérivées : unité de surface, unité de vitesse, unité d'accélération, unité de force, unité de travail, unité de puissance, unité de pression, unité de densité. Unités pratiques. — ***Unités de la mécanique industrielle.*** Unités fondamentales : unité de longueur, unité de temps, unité de force. Unités dérivées : unité de masse, unité de travail, unité de puissance. Remarques sur les systèmes d'unités........ 58

Hydrostatique. — Fluides. Liquides. Pressions exercées par les solides. Transmission d'une pression dans un liquide. Presse hydraulique. — ***Liquides pesants.*** Horizontalité de la surface libre. Pressions intérieures. Pression sur un élément plan horizontal à l'intérieur d'un liquide. Différence des pressions sur deux éléments égaux à des niveaux différents. — ***Pressions sur les parois des vases :*** pression sur le fond, pressions latérales. Résultante des pressions exercées sur les parois d'un vase. Recul dû à l'écoulement. — ***Pressions sur les corps immergés.*** Principe d'Archimède. Réaction exercée par un corps sur le liquide dans lequel il est plongé. Corps immergés et corps flottants. Équilibre des corps flottants........ 62

Détermination des densités. — ***Méthode du flacon.*** Corps liquides, corps solides, détermination du volume d'un vase, construction d'un vase gradué. — ***Méthode de la balance hydrostatique.*** Corps solides. Corps liquides. Détermination du volume d'un solide. — ***Aréomètres.*** Pèse-acides, pèse-esprits, alcoomètre centésimal de Gay-Lussac. Volumètres. Densimètres. Calcul des poids spécifiques. — ***Liquides superposés.*** Fiole des quatre éléments. Niveau à bulle. — ***Vases communiquants.*** Équilibre d'un liquide. Applications : jets d'eau, puits artésiens, distribution de l'eau dans les villes, écluses. Nivellement, niveau d'eau. Équilibre de deux liquides........ 77

Actions moléculaires. — ***Adhérence.*** Adhérence entre solides. Filtration. Teinture. Adhérence entre solide et gaz. Adhérence entre solide et liquide. — ***Capillarité.*** Ascensions et dépressions capillaires, dépressions barométriques. ***Tension superficielle.*** Expériences démontrant l'existence de la tension superficielle. Mesure de la tension superficielle. Explication par la tension superficielle des ascensions et dépressions capillaires. Calcul par la tension superficielle du poids d'une goutte liquide. Influence de la capillarité sur la poussée d'un corps flottant. — ***Osmose.*** Dialyse. Pression osmotique........ 89

Statique des gaz. — Expansibilité. Compressibilité et élasticité. Transmission des pressions par les gaz. — ***Pesanteur et pression des gaz.*** Pesanteur des gaz. Pressions exercées par un gaz pesant. — ***Pression atmosphérique.*** Expérience du baromètre. Interprétation de l'expérience du baromètre. Valeur de la pression atmosphérique. Expérience du Puy-de-Dôme. Effets de la pression atmosphérique, crève-vessie, hémisphères de Magdebourg. Résultante des pressions exercées par un gaz sur les solides immergés ; baroscope, corrections des pesées effectuées dans l'air. Corps immergés et corps flottants........ 97

Baromètres. — Baromètre normal. Baromètre de Fortin. Baromètre à siphon, baromètre à cadran. Baromètre métallique. Baromètre enregistreur. Mesure des hauteurs par le baromètre. Variations barométriques........ 105

Compressibilité des gaz. — Loi de Mariotte. Vérification : Pressions supérieures à la pression atmosphérique. Pressions inférieures à la pression

atmosphérique. Vérification par des pesées. Pressions notablement supérieures à la pression atmosphérique. Résultats. — ***Manomètres***. — ***Manomètres industriels*** : manomètres à air libre, manomètres à air comprimé, manomètres métalliques, manomètres à piston. — ***Manomètres de précision*** : pressions supérieures à la pression atmosphérique; pressions inférieures à la pression atmosphérique. Mesure de la force élastique d'un gaz dans une éprouvette. — ***Loi du mélange des gaz ou loi de Dalton***. Expérience de Berthollet. Osmose des gaz. — ***Dissolution des gaz dans les liquides***. Loi de la solubilité. Masse du gaz dissous dans une enceinte limitée. Dissolution d'un mélange gazeux 112

Navigation aérienne. — Sustentation (statique, dynamique). — ***Aérostats***, force ascensionnelle. Manœuvres de l'aérostat (ballonnet, guide rope, parachute). Ballons sondes. Ballons dirigeables. — ***Aéroplanes***. Mécanisme de la sustentation dynamique. — ***Propulsion***. — ***Direction*** 125

Machine pneumatique. — Description et fonctionnement. Force élastique dans le récipient après *n* coups de piston. Emploi de deux corps de pompe, piston et soupape, manomètre, platine, clef. Limite du vide. — ***Pompe à mercure***, description, manœuvre de la pompe. — ***Trompes*** : trompe à eau, trompe soufflante, injecteur, trompe à mercure. Mesure d'une très faible force élastique. — ***Machines de compression***. Force élastique dans le récipient après *n* coups de piston. Limite de la compression par l'espace nuisible. Pompe de bicyclette. Applications de l'air raréfié et de l'air comprimé. — ***Siphon*** : fonctionnement, amorcement, calcul complet de la pression. Fontaine intermittente Pipette. — ***Écoulement des liquides***. Écoulement par un orifice en mince paroi. Loi de Torricelli. Écoulement constant. Vase de Mariotte. ***Écoulement dans un tuyau*** ; travail dépensé dans l'écoulement 131

Pompe. — Pompe aspirante : description, amorcement, fonctionnement, effort nécessaire pour manœuvrer le piston. Pompe foulante, effort dans la manœuvre du piston. Pompe à incendie. Pompe aspirante et foulante. Presse hydraulique, calcul du travail, cuir embouti. Essai des chaudières. Ascenseurs hydrauliques 149

Historique. — Notions de mécanique. Pesanteur. Hydrostatique. Mécanique des gaz 157

CHALEUR

Sensations de chaleur et de froid. Effets de la chaleur. — ***Dilatations par la chaleur*** : solides, liquides, gaz 159

Mesure des températures. — Températures égales. Différence de températures. — ***Thermomètres***. Températures fixes. Principe de la construction d'un thermomètre centigrade. Choix d'une substance thermométrique. — ***Thermomètre à mercure*** : définition du degré, construction, détermination des points fixes. Échelles thermométriques, leur correspondance. Déplacement du zéro; sensibilité d'un thermomètre. Mesure des températures très basses. Thermomètre à alcool. — Thermomètres à maxima et à minima. — ***Thermomètre normal***. Emploi de thermomètres à mercure gradués 161

Dilatation des solides. — ***Formules des dilatations***. Dilatation linéaire. Dilatation superficielle. Dilatation cubique. Décroissement de la densité. — ***Dilatation linéaire des solides***. Méthode de Lavoisier et Laplace; méthode micrométrique; résultats. — ***Dilatation des liquides***. Dilatation absolue du mercure. Dilatation d'un liquide quelconque : méthode du thermomètre à tige, dilatation de l'enveloppe, dilatation du liquide, dilatation apparente; méthode du flacon. Résultats. — ***Dilatation de l'eau***. Maximum de densité de l'eau,

détermination précise de sa température. — *Applications des dilatations.* Réduction des hauteurs barométriques. Pression atmosphérique en dynes. Hauteur de mercure normal. Corrections des densités : solides, liquides. Efforts exercés par des dilatations ou des contractions 168

Dilatation des gaz. — *Dilatation d'un gaz sous pression constante.* Relation entre les volumes, les températures et les pressions. Calcul du volume d'un gaz dans les conditions normales de température et de pression. *Équation des gaz parfaits.* Extension à un mélange de gaz parfaits (masses égales à un gramme, masses équimoléculaires). Équation des gaz réels. Décroissement de la densité. Relation entre les densités, les températures et les pressions. — *Accroissement de pression sous volume constant.* Relation entre le volume, la température et la pression. Extension à un mélange de gaz. — *Mesure de la dilatation des gaz.* Expériences de Gay-Lussac, résultats. Expériences de Regnault; coefficient d'augmentation de pression sous volume constant; coefficient de dilatation sous pression constante. Résultats. Appareil de démonstration. — *Thermomètre normal.* Comparabilité des thermomètres à liquide. Comparabilité des thermomètres à gaz. Thermomètre à gaz sous volume constant. Thermomètre à hydrogène et à azote 183

Densité des gaz. — Définition de la densité d'un gaz par rapport à l'air. Calcul de la masse m d'un volume V d'air à t° et H. Calcul de la masse M d'un volume V de gaz à t° et H. Poids d'un volume V de gaz à t° et H. Mesure de la densité d'un gaz par rapport à l'air, expériences de Regnault. Masse d'un centimètre cube d'air. Variations avec la température et la pression de la densité d'un gaz par rapport à l'air; densités à température constante; densités à pression constante 197

Fusion. — Fusion brusque et fusion progressive. Lois de la fusion. Point de fusion. Changement de volume pendant la fusion. Variation du point de fusion avec la pression. Regel. — *Solidification.* Lois de la solidification. Changement de volume au moment de la solidification. Chaleurs de fusion et de solidification. Équilibre de fusion. Surfusion, solidification d'un liquide surfondu. — *Dissolution.* Abaissement moléculaire du point de congélation des dissolutions étendues. Chaleur de dissolution. Mélanges réfrigérants. Cristallisation. Sursaturation 202

Vaporisation. — *Vaporisation dans le vide.* Lois des pressions exercées par une vapeur. Vapeur non saturante. Vapeur saturante, propriétés des pressions maxima. Équilibre de vaporisation. Principe de la paroi froide ou principe de Watt. — *Mesure des forces élastiques maxima de la vapeur d'eau.* Mesures entre 0° et 100°, forces élastiques de la vapeur d'eau aux températures élevées; résultats. Forces élastiques maxima des dissolutions. — *Vaporisation dans un gaz.* Loi du mélange d'un gaz et d'une vapeur. Masse d'un volume V d'air humide. — *Densité des vapeurs.* Détermination expérimentale de la densité d'une vapeur, vapeur non saturante, vapeur saturante 211

Évaporation. — Vaporisation dans une atmosphère illimitée. Rapidité de l'évaporation dans une atmosphère illimitée 221

Ébullition. — *Lois de l'ébullition.* Description du phénomène de l'ébullition de l'eau. Condensation. — *Conditions qui font varier le point d'ébullition.* Abaissement du point d'ébullition sous de faibles pressions. Élévation du point d'ébullition avec la pression. Influence de la profondeur du liquide sur la température d'ébullition. Influence de la pureté du liquide. Élévation du point d'ébullition des dissolutions étendues. Influence de la présence d'un gaz. Influence de la viscosité du liquide. Détermination d'un point d'ébullition. Liquide chauffé en vase clos, marmite de Papin. — *Phénomènes de caléfaction.* — *Distillation.* Appareil à distillation, purification de l'eau, distillations fractionnées, essai des liquides alcooliques. Distillation dans le vide 222

Liquéfaction des vapeurs. — Compression, refroidissement........ 233

Liquéfaction des gaz. — Refroidissement sous la pression atmosphérique. Compression à la température ordinaire, appareil de Pouillet. Compression et refroidissement combinés : méthode de Faraday, appareil de liquéfaction de Cailletet. — ***Liquéfaction des gaz permanents.*** Gaz permanents. Courbes isothermiques de l'anhydride carbonique. *Température critique*. Conditions à réaliser pour liquéfier un gaz ; refroidissement par la détente. Liquéfaction persistante des gaz permanents. Solidification des gaz. Continuité de l'état liquide et de l'état gazeux, courbe de saturation. Air liquide............ 234

Hygrométrie. — Vapeur d'eau de l'atmosphère. But de l'hygrométrie, état hygrométrique. Hygromètres. Hygromètre chimique. Hygromètres de condensation, hygromètre d'Alluard. Hygromètres d'absorption, hygromètre à cheveu de Saussure.. 242

Équilibres physiques. — Équilibre stable, équilibre instable. Phases. — ***Équilibre d'un corps pur sous une seule phase.*** — ***Équilibre d'un corps pur sous deux phases.*** Phase liquide et phase gazeuse coexistantes. Phase solide et phase liquide coexistantes. Phase solide et phase gazeuse coexistantes. — ***Équilibre d'un corps pur sous trois phases.*** — ***Faux équilibres.*** Retard à la vaporisation. Retard à la liquéfaction. Retard à la solidification. Les faux équilibres sont irréversibles. — ***Équilibre d'une solution.*** Solution saturée, solution non saturée, point d'eutexie. — ***Équilibre osmotique.*** Lois de la pression osmotique des solutions étendues (masses égales à un gramme, masses équimoléculaires).. 247

Calorimétrie. — Sources de chaleur. Quantité de chaleur. Objet de la calorimétrie Caloric. — ***Principes expérimentaux.*** Définition pratique de la calorie. — ***Chaleurs spécifiques.*** Capacité calorifique. Détermination des chaleurs spécifiques moyennes. Méthode des mélanges, appareil de Regnault, calorimètre de Berthelot. Méthode de la fusion de la glace, calorimètre de Bunsen. Chaleurs spécifiques des gaz. Résultats. Loi de Dulong et Petit. Loi de Wœstyn. — ***Chaleurs de fusion.*** Corps solide à la température ordinaire. Corps liquide à la température ordinaire. Chaleur de fusion de la glace. — ***Chaleurs de vaporisation.*** Mesure d'une chaleur de vaporisation par la méthode des mélanges, appareil de Berthelot. Résultats. — ***Chaleur absorbée et dégagée dans une distillation.*** Froid produit par l'évaporation. Congélation de l'eau dans le vide. Applications (fabrication de la glace)................ 257

Propagation de la chaleur. — Mode d'échanges calorifiques (conductibilité, convection, rayonnement).. 271

Conductibilité. — Bons conducteurs. Mauvais conducteurs. Coefficient de conductibilité. Appareil d'Ingenhouz. Propriétés des toiles métalliques. Convection. Conductibilité des liquides. Conductibilité des gaz.............. 272

Rayonnement calorifique. — Rayonnement dans le vide. — ***Appareils de mesure.*** Thermomultiplicateur. Proportionnalité des quantités de chaleur aux impulsions. Lecture au galvanomètre par réflexion. Banc de Melloni. Radiomicromètre. Bolomètre. — ***Généralités sur la propagation de la chaleur.*** Dans un milieu homogène, la chaleur se propage en ligne droite. Loi du carré des distances. Intensité d'une source. Loi du refroidissement de Newton. Propriétés des corps relativement à la chaleur rayonnante. — ***Réflexion de la chaleur.*** Lois géométriques de la réflexion. Miroirs ardents. Miroirs conjugués. Pouvoir réflecteur. — ***Transmission de la chaleur.*** — ***Réfraction de la chaleur.*** Décomposition de la chaleur solaire par un prisme. Distribution de la chaleur dans un spectre prismatique solaire. Spectres calorifiques de diverses sources. — ***Pouvoirs diathermanes.*** Détermination des pouvoirs diathermanes, influence de la nature de la source, influence de la nature de la substance (substances transparentes, sel gemme, vapeur d'eau; substances non transparentes; inter-

position de deux lames différentes). — ***Absorption de la chaleur.*** — ***Émission de la chaleur.*** Mesures des pouvoirs émissifs, égalité des pouvoirs émissifs et des pouvoirs absorbants. Mesure de la chaleur solaire.................. 277

Application des lois de la chaleur. — ***Météores aqueux.*** Rosée (influence du pouvoir émissif et de la conductibilité, exposition et état du ciel, agitation de l'air). Nuages (variétés de nuages, formation des nuages). Brouillards. Pluie. Neige. Givre. Verglas. Grêle. — ***Météores gazeux.*** Vents. Vitesse du vent. Vents périodiques. Vents constants. Cyclones. — ***Chauffage des appartements.*** Cheminées, conditions qui accroissent le tirage, causes de tirage insuffisant. Poêles. Calorifères.. 291

Équivalent mécanique de la calorie. — Relation entre la chaleur et l'énergie mécanique. — ***Transformation du travail mécanique en chaleur.*** Percussion, frottement, compression. — ***Transformation de la chaleur en travail mécanique.*** — ***Principe de l'équivalence,*** équivalent mécanique de la calorie. — ***Détermination de l'équivalent mécanique de la calorie.*** Expérience de Joule (appareil, principe de la méthode, travail employé à vaincre le frottement, chaleur gagnée par le calorimètre, résultat). Expérience de Hirn (principe de la méthode, calcul de la chaleur disparue, calcul du travail produit). Invariabilité de l'équivalent mécanique de la calorie. — ***Analyse des effets de la chaleur sur un corps :*** 1° effets extérieurs, 2° effets intérieurs. Énergie interne d'un corps. Équation générale de l'équivalence. Conditions précises de l'équivalence. Détente d'un gaz dans le vide. Détente d'un gaz dans l'air. Compression d'un gaz. Chaleurs spécifiques des gaz à volume constant et à pression constante. Calcul de l'équivalent mécanique de la calorie par Mayer. Hypothèses sur la nature de la chaleur.. 302

Machines à vapeur. — Première machine à vapeur. Chaudière, corps de pompe et condenseur distincts. — ***Chaudière à vapeur.*** Chaudière à bouilleurs. Accessoires de la chaudière (indicateur de la pression, indicateur du niveau de l'eau, appareils d'alimentation). — ***Condenseur.*** — ***Mécanisme moteur.*** Corps de pompe. Distribution de la vapeur, fonctionnement du tiroir. Organes de transmission. Transformation du mouvement alternatif du piston en mouvement de rotation continu. Excentrique. Organes de régulation, volant, régulateur à boules. — ***Détente.*** Gain de travail par la détente. — ***Divers types de machines à vapeur.*** — ***Puissance :*** indicateur de Watt, frein de Prony. — ***Principe de Carnot.*** — ***Rendement dans une machine thermique.*** Pertes d'énergie dans une transformation d'énergie. Rendement industriel. — ***Machines à explosion :*** description, fonctionnement, mesure du travail, rendement, gaz employés. — ***Turbines à vapeur.*** 311

Conservation de l'énergie. — Variétés d'énergie. Énergie calorifique. Énergie chimique. Énergie électrique. Phénomènes vitaux. Énergie solaire. — ***Système isolé*** (son énergie reste constante)...................... 330

Dégradation de l'énergie. — Déperdition de l'énergie utilisable... 333

Historique. — Thermomètres. Dilatations. Vapeurs. Calorimétrie. Équivalent mécanique de la chaleur. Rayonnement calorifique................. 334

ACOUSTIQUE

Objet de l'acoustique. Vibrations sonores. Transmission d'un mouvement vibratoire. Le son ne se propage pas dans le vide. — ***Vitesse du son.*** Mesure de la vitesse du son dans l'air. Méthode graphique de Regnault. Résultats. Vitesse de propagation du son dans l'eau. Vitesse de propagation du son dans la fonte de fer.. 337

Réflexion du son. — Lois de la réflexion du son. Expérience des miroirs conjugués. Échos. Réfraction du son 344

Qualités du son. — Intensité, loi du carré des distances; hauteur; timbre — ***Mesure du nombre de vibrations.*** Sirène. Méthode graphique. Limite des sons perceptibles. Généralisation de la méthode graphique. Chronographe inscripteur 347

Sons musicaux. — Intervalle de deux sons. Accords. Accord parfait. — ***Gamme.*** Notes. Diapason normal. Échelle musicale. Intervalles successifs de la gamme. Tons et demi-tons. Dièzes, bémols. Gamme tempérée. Gammes mineures. Harmoniques. Influence du déplacement relatif sur la hauteur d'un son 354

Tuyaux sonores. — Embouchure de flûte. L'air vibre dans un tuyau sonore, influence des parois, influence de la nature du gaz. Un tuyau sonore se comporte comme un résonateur. — ***Lois des tuyaux cylindriques ou prismatiques.*** Lois des harmoniques, tuyaux fermés, tuyaux ouverts. Loi des longueurs. Série complète des harmoniques. Nœuds et ventres fixes. Répartition générale des nœuds et des ventres, études des nœuds et des ventres par les flammes manométriques. Tuyaux à anche, anche libre, anche battante. Instruments à vent. — ***Loi de similitude*** 361

Vibrations des corps solides. — Lois des vibrations longitudinales des tiges. — ***Vibrations transversales des cordes.*** Lois. Vérifications expérimentales (sonomètre, loi des longueurs). Instruments à cordes. Vibrations transversales des tiges. Diapason 368

Timbre. — Vibration par influence ou résonance, son simple, son composé. Les diapasons, les tuyaux sphériques rendent des sons simples. Analyse des sons. Nature du timbre. Synthèse des sons. Distinction entre un son musical et un bruit. Étude du timbre par les tracés graphiques. Phonautographe. Phonographe 373

Historique 378

MOUVEMENTS VIBRATOIRES

Mouvement vibratoire. — ***Ondes liquides.*** Propagation. Longueur d'onde. — ***Interférences.*** — ***Interférences par réflexion*** 380

Ondes sonores. — Propagation du son dans un tuyau cylindrique. Propagation du son dans un milieu indéfini. — ***Interférences sonores.*** — ***Interférences par réflexion.*** — ***Interférences dans les tuyaux sonores.*** Tuyau fermé, tuyau ouvert. Lois des harmoniques. Nœuds et Ventres. Représentation graphique de la production des nœuds et des ventres. Calcul algébrique de la position des nœuds et des ventres. Mesure indirecte de la vitesse du son au moyen des tuyaux sonores. — ***Interférences des sons de périodes différentes*** (battements) 386

OPTIQUE

Corps lumineux. Corps transparents, corps translucides, corps opaques. — ***Propagation rectiligne de la lumière.*** Chambre noire. Image du soleil. Tracé géométrique des ombres, corps opaque devant un point lumineux, corps opaque devant une sphère lumineuse. Pénombre. Éclipses. — ***Vitesse de la lumière.*** La vitesse de la propagation de la lumière est uniforme. — ***Mesure de***

la vitesse de la lumière. Méthode astronomique de Rœmer. Méthode physique de Fizeau. Résultats 397

Photométrie. — Quantité de lumière. Intensité. Loi du carré des distances. Proposition fondamentale de la photométrie. Photomètre de Bouguer. Photomètre de Foucault. Photomètre de Bunsen. Unité d'intensité. Unité d'éclairement. Unité d'éclat 407

Réflexion. — *Lois de la réflexion régulière.* Vérification des lois de la réflexion. Réversibilité des rayons. Vérification astronomique. — ***Miroirs plans.*** Image d'un point, image d'un objet. Champ d'un miroir plan pour une position de l'œil. Sextant. Réflexions multiples sur deux miroirs plans parallèles. Images sur deux miroirs inclinés. Double réflexion entre deux miroirs inclinés. Miroir plan recevant des rayons convergents. Miroirs tournants. Mesure optique des petits angles. Intensité de la lumière réfléchie. Polarisation par réflexion. — ***Réflexion irrégulière ou diffusion.*** — ***Réflexion sur une surface courbe.*** — ***Miroirs sphériques concaves.*** Foyer principal. Axes secondaires. Plans focaux. Foyers conjugués Construction du conjugué d'un point. Image d'un objet. Image d'une droite perpendiculaire à l'axe principal. Positions et grandeurs de l'image : droite réelle au delà du foyer principal, droite réelle entre le foyer et le miroir, droite virtuelle en arrière du miroir. Remarques générales. Formule générale. Formule de Newton. Vérifications expérimentales. Mesure de la distance focale d'un miroir concave. — ***Miroirs sphériques convexes.*** Foyer principal. Axes secondaires. Plan focal. Foyers conjugués. Construction du conjugué d'un point lumineux. Image d'un objet. Droite perpendiculaire à l'axe principal. Positions et grandeurs de l'image : droite réelle placée du côté de la surface réfléchissante, droite virtuelle entre le miroir et le foyer principal, droite virtuelle au delà du foyer principal. Remarques générales. Formule générale. Détermination de la distance focale principale d'un miroir convexe. Aberration de sphéricité 411

Réfraction. — Déviation brusque d'un rayon lumineux. — *Lois de la réfraction*, vérification. Réversibilité. Déplacement apparent des objets par réfraction. Réfraction atmosphérique. Passage de la lumière dans un milieu plus réfringent. Passage de la lumière dans un milieu moins réfringent. *Réflexion totale.* Prisme à réflexion totale. Chambre claire. Mirage. Réfraction à travers une lame à faces parallèles. Réfraction à travers plusieurs lames. Indices absolus. Énoncé général de la loi des sinus. Images par réfraction 437

Prisme. — Marche des rayons dans un prisme. Construction du rayon dévié, calcul de la déviation. Étude expérimentale de la déviation (la déviation augmente avec l'angle réfringent, la déviation varie avec l'angle d'incidence; conditions d'émergence, *minimum de déviation*). Mesure des indices de réfraction. Images par réfraction à travers un prisme 449

Lentilles. Axe principal. — ***Lentilles convergentes.*** Marche des rayons parallèles à l'axe principal. Foyers conjugués. Centre optique. Axes secondaires. Position du centre optique. *Lentille infiniment mince.* Plans focaux. Construction du foyer conjugué d'un point lumineux. Image d'un objet. Image d'une droite perpendiculaire à l'axe principal. Positions et grandeurs des images : droite réelle; droite virtuelle située au delà de la lentille. Remarques générales. Formule générale. Relation entre la distance focale principale, l'indice de la substance et les rayons des surfaces sphériques terminales. Distances comptées à partir des foyers. Vérifications expérimentales. Détermination de la distance focale d'une lentille convergente. — ***Lentilles divergentes.*** Marche des rayons parallèles à l'axe principal. Foyers conjugués, centre optique, position du centre optique. *Lentille infiniment mince*, axes secondaires. Plans focaux. Construction du conjugué d'un point. Image d'un objet. Droite perpendiculaire à l'axe principal. Positions et grandeurs de l'image : droite réelle située en avant de la lentille; droite virtuelle située entre la lentille et le deuxième foyer principal, droite virtuelle située au delà du deuxième foyer

Remarques générales. Formule générale. — *Convergence d'une lentille*. Lentilles minces juxtaposées. — Mesure de la distance focale d'une lentille divergente. Aberration de sphéricité. Lentille des phares...................... 455

Double réfraction. — Substances biréfringentes. Corps biréfringents à un axe. Caractères des deux rayons réfractés. Section principale. Plan d'incidence dans une section principale. Plan d'incidence perpendiculaire à l'axe optique.. 473

Dispersion. — ***Décomposition de la lumière blanche***. Dispersion de la lumière. Spectre virtuel. Les couleurs du spectre sont inégalement réfrangibles. Décomposition de la lumière par une lentille convergente. Influence de la nature et de l'angle du prisme sur la dispersion. — ***Recomposition de la lumière blanche***. Recomposition par un prisme. Recomposition par une lentille convergente ou par un miroir concave. Recomposition physiologique. — ***Classification des couleurs***. Couleurs simples. Couleurs composées. Couleurs complémentaires. Couleurs des corps : coloration par transparence, coloration par diffusion. — ***Spectres des sources lumineuses***. Production d'un spectre pur. Raies du spectre solaire. Propriétés lumineuses, calorifiques, chimiques, physiologiques du spectre solaire. Inséparabilité des effets d'une radiation. Goniomètre de Babinet. Spectroscope. Différents types de spectres (spectres continus sans raies, spectres discontinus, spectres continus sillonnés de raies noires). Analyse spectrale. — ***Spectres d'absorption***. Absorption des radiations lumineuses (substances incolores, substances colorées, corps monochromatiques). Absorption dans les spectres infra-rouge et ultra-violet. Absorption par les vapeurs métalliques. Origine des raies du spectre solaire. Raies telluriques. — ***Incandescence. Corps noirs***. Rendement lumineux des corps noirs. ***Corps colorés;*** manchon Auer. — ***Luminescence***. Phosphorescence (radiations actives, radiations émises, action des rayons peu réfrangibles; durée de la phosphorescence). Fluorescence (radiations actives, radiations émises; oculaire fluorescent). — ***Lentilles achromatiques***. Dispersion des images par réfraction. Mécanisme de l'achromatisme. Relation d'achromatisme. — ***Arc-en-ciel***. Description. Explication de l'arc rouge. Irisations. Arc-en-ciel extérieur..... 475

Vision. — Description de l'œil. Rôle optique de l'œil. Image rétinienne. Distance de la vision distincte, mécanisme de l'accommodation. Distance minimum de la vision distincte (emmétropie, myopie, hypermétropie). Puissance de l'œil. Pouvoir séparateur. Besicles (correction de la myopie, correction de l'hypermétropie). Astigmatisme, correction de l'astigmatisme. Correction de la presbytie. Ophtalmoscope. Évaluation des distances. Appréciation du rélief (stéréoscope). Persistance des impressions. Contraste des couleurs............ 501

Instruments d'optique. — Chambre noire. Appareil de projection. Classement des instruments d'optique proprement dits (puissance, grossissement, mise au point). — ***Loupe***. Position de l'objet, marche des rayons, mise au point, puisssance, pouvoir séparateur, grossissement, achromatisme. Loupe montée. — ***Microscope composé***. Construction des images, marche des rayons, mise au point, puissance, mesure expérimentale de la puissance, grossissement, détermination de la grandeur d'un objet, pouvoir séparateur, champ du microscope, oculaire, cercle oculaire. Microphotographie. Ultramicroscope. — ***Lunette astronomique***. Construction des images, marche des rayons, mise au point, grossissement, mesure expérimentale du grossissement, pouvoir séparateur, clarté dans une lunette astronomique, champ, réticule, axe optique, chercheur, position de l'œil. — Lunettes viseurs. — Lunette terrestre. Lunette de Galilée, construction des images, marche des rayons, mise au point, grossissement, absence de réticule. — ***Télescope de Newton***, construction des images, marche des rayons, mise au point, grossissement, cercle oculaire, champ. Avantages des télescopes. Télégraphie optique.............................. 511

Photographie. — Principe de la photographie. — ***Formation de l'image***. Appareils photographiques, mise au point. — ***Épreuve négative sur verre***,

pose, développement, fixage. Cliché négatif. — *Épreuves positives sur papier*. Virage. Epreuves positives au charbon. — *Chronophotographie*. Analyse du mouvement. Synthèse du mouvement........................ 531

ONDES LUMINEUSES

Hypothèse du mouvement vibratoire lumineux, hypothèse de l'éther. Qualités d'une lumière. Propagation d'un mouvement vibratoire lumineux; les vibrations lumineuses sont *transversales*. Surface d'onde. Vitesse de propagation, fréquence, période, longueur d'onde.—***Longueurs d'onde des diverses radiations***. Vibrations lentes, vibrations rapides. Graduation d'un spectroscope. Influence du déplacement relatif sur la fréquence apparente d'une radiation. Vitesse de propagation dans les différents corps. Valeur théorique de l'indice de réfraction. Construction d'Huygens. Spectre normal. Anomalies de dispersion. — ***Interférences lumineuses***. Expérience des deux miroirs de Fresnel, position des franges d'interférences, *construction graphique de Fresnel*. — ***Interférences par réflexion***. — ***Diffraction***. Explication des phénomènes de diffraction par le principe d'Huygens (diffraction par une ouverture circulaire). Théorie des réseaux. Pouvoir séparateur des lunettes. — ***Polarisation***. Polarisation par double réfraction. Étude expérimentale d'un rayon polarisé. Loi de Malus. Vibrations transversales. Décomposition mécanique des vibrations. Prisme de Nicol, nicols croisés, détermination de la direction d'une vibration. Polarisation rotatoire, mesure des pouvoirs rotatoires............... 537

Historique. — Vitesse de la lumière. Réflexion. Réfraction. Instruments d'optique. Dispersion. Photographie. Optique physique.................. 563

ÉLECTRICITÉ STATIQUE

Phénomènes généraux. — Electrisation par le frottement. Bons conducteurs. Mauvais conducteurs. Isolants. Pendule électrique. Communication d'électricité par contact. Deux espèces d'électricité. Double pendule. Quantités d'électricité égales. Electricités positive et négative, développement simultané des deux électricités. Etat neutre. L'électricité se porte à la surface des conducteurs.. 565

Influence électrique. — Champ électrique. Influence, expérience, interprétation. Communication de l'induit avec le sol. Charge par influence. Attraction des corps légers (corps léger à l'état neutre). — ***Électroscope***. Pendule électrique. Electroscope à feuilles d'or. Action d'un corps électrisé sur un électroscope. Détermination du signe de l'électricité d'un corps électrisé. — ***Cylindre de Faraday***. Définition des quantités d'électricité. Mesure des quantités d'électricité. Influence à l'intérieur d'un conducteur fermé, écrans électriques, résumé. Action extérieure d'une couche sphérique uniforme. — Diélectriques. — ***Flux de force électrique***. Lignes de force. Distribution des lignes de force dans un champ électrique. — ***Lois des attractions et répulsions électriques***. — ***Distribution de l'électricité***. Comparaison des densités en deux points. Distribution sur un conducteur quelconque.................................. 585

Déperdition de l'électricité. — Pression électrostatique, explication par la pression électrostatique des attractions et des répulsions des conducteurs électrisés. — ***Rôle des pointes***. Corps électrisé terminé en pointe. Pointe présentée à un corps électrisé. Etincelle. Conservation de l'électricité. Déperdition lente de l'électricité.. 583

Potentiel. — ***Définition expérimentale du potentiel***. Conducteurs au même potentiel. Potentiels différents. Communication de deux conducteurs ayant des potentiels différents. Comparaison des potentiels. Graduation d'un électroscope

en volts. Le passage d'électricité entre deux conducteurs dépend de leur différence de potentiel. Conductibilité. Analogies calorifiques, potentiel et température. — Analogies hydrauliques, potentiel et niveau. Potentiel en un point d'un champ électrique.. 586

Capacité. — Conducteur isolé, conducteur soumis à des influences électriques. Unité de capacité. Capacité calorifique et électrique. Partage de l'électricité entre deux conducteurs en communication lointaine, potentiel final; application à la mesure des potentiels. Mesure des capacités électriques. Variations du potentiel et de la capacité dans l'influence électrique : 1° sur l'inducteur, 2° sur l'induit. Unités électrostatiques.......................... 589

Énergie électrique. — Energie d'un conducteur électrisé. Energie potentielle d'une charge électrique au potentiel V. Signification du potentiel d'un conducteur. Travail d'une charge électrique M passant du potentiel V_1 au potentiel V_2. Energie d'un conducteur isolé à charge limitée. Energie d'un système de conducteurs électrisés. *Expression du potentiel*, potentiel en un point du champ d'une sphère uniformément électrisée, surfaces équipotentielles. Energie potentielle d'un champ électrique. Energie potentielle d'un systène de conducteurs. Unités pratiques : coulomb, volt, farad.............................. 593

Machines électriques. — ***Machines à frottement.*** Machine de Ramsden. Description, fonctionnement, potentiel du collecteur, débit. Limite de la charge. Source de l'énergie électrique. — ***Machines à influence.*** *Machine de Wimshurt;* description, potentiel maximum, débit, quantité d'électricité des décharges. Source de l'énergie électrique. Théorie du fonctionnement. Réversibilité des machines à influence. — ***Electrophore.*** Fonctionnement. Source de l'énergie électrique.. 598

Condensateurs. — Théorie, charge du collecteur seul, charge du collecteur avec condensation, écartement des plateaux, capacité. — ***Bouteille de Leyde.*** Charge d'un condensateur. Rôle de la lame isolante. Pouvoir inducteur spécifique. Calcul de la charge d'un condensateur (action sur une masse électrique d'un plan indéfini uniformément électrisé, les charges contraires des faces en regard ont la même densité, action des deux couches sur un point du diélectrique, valeur de la densité électrique sur une des armatures). — ***Décharge d'un condensateur.*** Décharge rapide. L'électricité se porte sur la lame isolante, bouteille à armatures mobiles. Étincelles résiduelles. Batterie. Condensateurs de grande capacité. Énergie d'un condensateur. Condensateurs en série. — ***Électroscope condensateur.*** Définition, usage, explication. Déformation électrique de la lame isolante d'un condensateur. — ***Effets des décharges électriques.*** Effets lumineux. Lueurs dans les gaz, tubes étincelants. Effets calorifiques, inflammation, échauffement des conducteurs. Mesure de l'énergie d'une décharge (thermomètre à air, bouteille micrométrique). Effets chimiques. Effets mécaniques. Effets physiologiques, commotion par une décharge de condensateur. Électrisation sur un tabouret isolant.. 606

Électricité atmosphérique. — L'atmosphère est un champ électrique. Potentiel en un point de l'atmosphère. Recherche du potentiel en un point (par un conducteur en pointe, par un écoulement d'eau). — ***Électricité des orages.*** Les orages sont des phénomènes électriques. Électrisation par l'influence d'un nuage orageux. Formation de nuages positifs et négatifs. Éclairs. Tonnerre. Foudre, effets de la foudre. — ***Paratonnerres.*** Paratonnerre à tige. Paratonnerre à réseau.. 623

MAGNÉTISME

Aimants. — Substances magnétiques. Pendule magnétique. Pôles magnétiques. Orientation des aimants. Distinction des pôles. Actions réciproques des

pôles de deux aimants. Aimants brisés. Hypothèse sur la constitution des aimants. Lois des actions magnétiques. Unité de magnétisme. — ***Aimantation par influence***. Champ magnétique. Aimantation par influence. Aimantation de l'acier, force coercitive. — ***Méthodes d'aimantation***. Aimantation par la simple touche, aimantation par touche séparée, aimantation par les courants. Aimantation maximum et aimantation permanente. Variation de l'aimantation avec la température. — ***Diamagnétisme***. Substances paramagnétiques et diamagnétiques.......... 628

Magnétisme terrestre. — L'action de la terre sur un aimant est seulement directrice : la force isolée n'a pas de composante horizontale, elle n'a pas de composante verticale. Couple directeur. Égalité des masses magnétiques nord et sud dans un aimant. Position des pôles, définition précise des pôles. Méridien magnétique. Inclinaison. Déclinaison. Décomposition de la force magnétique terrestre. Mesure de la déclinaison. Mesure de l'inclinaison. Boussoles. Boussole marine. Variations de la déclinaison et de l'inclinaison (aux différents lieux du globe, en un lieu déterminé). Intensité de la force magnétique terrestre. Oscillations d'un barreau aimanté. Moment magnétique d'un aimant. Intensité d'aimantation.......... 634

Flux magnétique. — ***Lignes de force***. — ***Spectres magnétiques***. Exemples de spectres magnétiques. — Flux de force d'un pôle magnétique. Relation entre le flux de force et la force magnétique. — ***Propriétés des lignes de force magnétique***. Distribution des lignes de force dans l'influence magnétique. Orientation d'une substance magnétique dans un champ magnétique. Attractions par raccourcissement des lignes de force. Circuits magnétiques fermés, anneau fermé, conservation des aimants. Relation entre le flux de force et la position d'équilibre d'un aimant.......... 643

ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE

Pile voltaïque. — Description de l'élément de Volta. Charges électrostatiques aux pôles. Différence de potentiel aux deux pôles. Pile de plusieurs éléments. Courant électrique, sens du courant. Premiers modèles de pile (pile à colonne de Volta, pile à tasses, pile de Wollaston.) — ***Historique de la formation d'un élément de pile***. Différence de potentiel au contact de deux métaux. Classement des métaux d'après leur signe. Loi de Volta. Formation d'un élément de pile par l'interposition d'un liquide. — ***Effets du courant électrique***. Comparaison des décharges et des courants de pile. Analogie hydraulique.......... 649

Force électromotrice, intensité, résistance. — ***Mesure de la force électromotrice d'un élément de pile***. Électromètre à quadrants. Unité de force électromotrice. — ***Mesure du débit d'un courant***. Méthode chimique. Décomposition de l'eau par un courant; voltamètre, voltamètres en série, voltamètres parallèles. Intensité. Unité d'intensité. Unité de quantité d'électricité. Mesure magnétique, galvanomètre. — ***Résistance d'un circuit***. Résistances égales, résistances multiples. Unité de résistance. Boîtes de résistances. Mesure d'une résistance. Résultats. Résistance d'un élément de pile. Résistance totale d'un circuit.......... 656

Loi d'Ohm. — Charges électrostatiques sur le trajet d'un courant. Différence de potentiel entre deux points d'un circuit. Loi d'Ohm pour un conducteur. Conséquences de la loi d'Ohm relative à un conducteur. Extension de la loi d'Ohm au circuit tout entier. Résumé sur la loi d'Ohm. Différence de potentiel aux deux pôles d'une pile en circuit fermé. — ***Applications de la loi d'Ohm***. Groupement des éléments d'une pile (groupement en série, groupement en batterie ou en surface, groupement mixte). Débit des machines électrostatiques. Courants dérivés. Réseau de conducteurs et *lois de Kirchhoff*. Pont de Wheatstone,

détermination expérimentale d'une résistance par le pont de Wheatstone, pont de Wheatstone hydraulique. Détermination des constantes d'une pile (mesure de la force électromotrice, mesure de la résistance intérieure)............ 664

Effets calorifiques des courants. — Expériences de Joule. Loi de Joule. Définition du volt. Travail développé dans le circuit entier. Distribution relative de la chaleur dans un circuit : chaleur perdue dans la pile, puissance maximum. Applications des effets calorifiques du courant. Analogie hydraulique (énergie hydraulique, énergie électrique)........................ 675

Effets chimiques du courant. — Électrolyse. Décomposition de l'eau. Décomposition des sels métalliques. Composés binaires. Sels oxygénés. —*Lois de l'électrolyse*. Mesure d'une intensité de courant ou d'une quantité d'électricité par l'électrolyse. Effets chimiques dans la pile. — *Actions secondaires*. Décomposition du sulfate de cuivre. Décomposition d'un sulfate alcalin. Décomposition de l'eau acidulée sulfurique. Soupape électrolytique. — *Polarisation d'un voltamètre*. Énergie électrique dépensée dans l'électrolyse. Calcul d'une force électromotrice de polarisation. Résistance d'une solution saline. Théorie de l'électrolyse. *Hypothèse des ions*.. 680

Applications de l'électrolyse. — Galvanoplastie, préparation d'un moule-dépôt de cuivre sur le moule. Appareil simple. Applications industrielles de la galvanoplastie. Dorure, argenture, nickelage. Électrochimie. Préparation des métaux. — *Construction des éléments de pile*. Zinc amalgamé. Affaiblissement du courant d'un élément de Volta. Dépolarisation de la plaque positive. Piles à un liquide à dépolarisants chimiques (élément au bichromate de potassium, élément Leclanché). Piles constantes à liquides séparés (élément Daniell, élément Bunsen). Étalon de force électromotrice. — *Origine de l'énergie électrique d'une pile*. Phénomènes chimiques dans un circuit de pile fermé. Rôle d'une pile, comparaison d'une pile et d'une machine à vapeur. Calcul de la force électromotrice d'un élément de pile. — *Piles secondaires*. Pile à gaz. Accumulateurs, constantes d'un accumulateur, charge et décharge, capacité, puissance. Mode de fonctionnement d'un accumulateur.................. 689

Piles thermo-électriques. — Expérience de Seebeck. Pile thermo-électrique. Lois des forces électromotrices. Phénomène de l'inversion. — *Mesure des températures*. Thermomultiplicateur. Pince thermo-électrique. Aiguilles thermo-électriques. Pyromètre électrique. Piles thermo-électriques industrielles. Source de l'énergie électrique d'une pile thermo-électrique. Détermination du rendement.. 699

Électromagnétisme. — Expérience d'Œrsted. Règle d'Ampère. Champ magnétique d'un courant. Spectre magnétique d'un courant rectiligne. Action magnétique d'un circuit plan. Spectre magnétique d'un circuit plan. — *Théorème d'Ampère*. Supports des courants mobiles. Orientation d'un cadre traversé par un courant. Action d'un aimant sur un cadre. Systèmes astatiques. Solénoïdes. Spectre d'un solénoïde. Orientation d'un solénoïde. Action d'un aimant sur un solénoïde. Action d'un courant sur un solénoïde. Action mutuelle de deux solénoïdes. Déplacement d'un système magnétique dans un champ magnétique. — *Loi de Laplace*. Accord de la loi de Laplace et du théorème d'Ampère. Applications spéciales de la loi de Laplace, action mutuelle de deux courants rectilignes et parallèles, roue de Barlow, rotation d'un courant horizontal. Travail des forces électromagnétiques. Rotation d'un courant par un aimant.. 704

Électrodynamique. — Expérience des courants parallèles, expérience des courants angulaires, expérience des courants sinueux. Assimilation des aimants aux solénoïdes. Action extérieure d'un aimant ou d'un faisceau de solénoïdes.. 717

Galvanomètres. — *Galvanomètres à aimant mobile*. Multiplicateur. Boussole des tangentes. Aimant astatique. Galvanomètre de Nobili. Galvano-

mètre à deux cadres. Lecture par réflexion. — *Galvanomètre à cadre mobile.* Description, fonctionnement. *Emploi des dérivations.* — *Galvanomètres industriels.* Ampèremètre. Voltmètre. Électrodynamomètre. Wattmètre. Ampèremètre thermique. Voltmètre thermique........................ 720

Unités électriques........................ 730

Aimantation par les courants. — Aimantation par un courant, points conséquents. Aimantation du fer doux, constitution d'un aimant creux. Électroaimants. Magnétisme rémanent. Loi des électroaimants. Flux de force d'un électroaimant. *Hystérésis.* Circuit magnétique, différence entre un aimant et un électroaimant. — *Applications des électroaimants.* Sonnerie électrique à trembleur. Télégraphe électrique (pile, fil de ligne, manipulateur de Morse, récepteur de Morse, signes, communication par un seul fil, relais télégraphique, installation des postes télégraphiques). Transmissions rapides, télégraphe imprimant de Hughes. Transmetteur multiple. Câbles souterrains et sous-marins........................ 776

Induction. — *Induction par les courants.* Induction par fermeture ou ouverture. Induction par accroissement ou diminution d'intensité. Induction par approche ou éloignement. — *Induction par les aimants.* Induction par approche ou éloignement. Induction par aimantation ou désaimantation. Induction par variation d'un aimant. — *Induction d'un courant sur son circuit.* Effets des courants de self-induction. — *Effets des courants induits.* Inductions d'ordres successifs. — *Loi de Lenz.* Source de l'énergie d'un courant induit. Courants d'induction dans les masses métalliques. Amortissement des oscillations d'un galvanomètre. — *Lois de l'induction.* Conditions de production des courants induits. Sens des courants induits. Induction par la terre. Force électromotrice induite. Résumé des phénomènes d'induction. *Force électromotrice élémentaire.* — *Bobine d'induction :* description, fonctionnement; propriétés des courants induits d'ouverture et de fermeture; pôles positif et négatif d'une bobine d'induction. Description des divers organes; interrupteur à trembleur, interrupteur de Foucault, interrupteur électrolytique; condensateur, son rôle. Division du noyau de fer doux. Cloisonnement de la bobine induite. Usages de la bobine d'induction; charge d'un condensateur. — *Téléphones.* Téléphone magnétique; téléphone à pile, microphone, transmetteur Ader, emploi d'un transformateur........................ 743

Machines d'induction. — *Machine de Gramme.* Description, anneau, champ magnétique. Fonctionnement, courant induit total, captage du courant par le collecteur, plan neutre, calcul de la force électromotrice. Source de l'énergie électrique produite. Calcul de l'énergie électrique utilisable. Machines industrielles. — *Moteurs electriques.* Réversibilité de la machine de Gramme. Fonctionnement du moteur de Gramme, rendement d'un moteur électrique. Avantages des moteurs électriques. Transport d'énergie à distance. Voitures électriques........................ 766

Courants alternatifs. — Courant alternatif sinusoïdal. — *Machines industrielles à courants alternatifs.* Machine de Siemens. Alternateurs à induits fixes. — *Effets des courants alternatifs.* Intensité efficace. Fréquence. Oscillographe. — *Self-induction d'un courant alternatif.* Self-induction du cadre tournant. Bobine à réaction. Puissance. — *Effets d'induction mutuelle.* Transformateurs. — *Condensateur dans un circuit alternatif.* — *Moteurs à courant alternatif.* Courants polyphasés. Moteurs à champ tournant.......... 776

Effets lumineux du courant. — *Décharges dans les gaz raréfiés.* Tube de Geissler. Tube de Crookes. Rayons cathodiques. Rayons de Röntgen. Substances radioactives. Tubes de Hittorf. — *Arc voltaïque.* Étincelle de fermeture. Étincelle de rupture. Arc voltaïque. Fours électriques. Lampe à mercure. — *Éclairage électrique.* Éclairage par l'arc voltaïque. Éclairage par incandescence........................ 792

Effets physiologiques des courants. — ***Action des courants continus.*** Commotions au contact des deux pôles d'une pile. Effets sur les nerfs sensibles et sur les nerfs moteurs. Effets sur les nerfs de sensibilité spéciale. ***Expérience de Galvani.*** Phénomènes qui accompagnent le passage d'un courant continu. — ***Action des courants induits*** 803

ONDES ÉLECTRIQUES

Décharge oscillante d'un condensateur. — Décharge continue. Décharge oscillante. — ***Effets d'induction des décharges oscillantes.*** Production des courants de haute fréquence. Propriétés des courants de haute fréquence. 815

Radioconducteurs. — ***Expériences de M. Branly.*** Variétés de radioconducteurs. Action des milieux. Conditions de l'action. Usages des radioconducteurs. Action du choc. — ***Télégraphie sans fil.*** Poste d'émission. Poste de réception. Récepteur de M. Branly. Réception par le téléphone. La télégraphie sans fil en mer. — ***Télémécanique sans fil*** 819

Interférences électriques et résonance. — ***Expériences de Hertz.*** Excitateur de Hertz. Résonateur de Hertz. — Interférences par réflexion. — ***Application de la résonance à la télégraphie sans fil.*** — ***Téléphonie sans fil.*** 821

Historique. — Électricité statique. Magnétisme. Électricité dynamique Ondes électriques 836

PROBLÈMES

Pesanteur. — Travail, énergie. Chute des corps. Pendule. Attraction universelle. Balance. Densités. Hydrostatique. Détermination des densités. Pression atmosphérique. Compressibilité des gaz. Manomètres, mélange des gaz. Corps plongés dans l'air. Vide et compression. Siphon, pompes 832

Chaleur. — Températures et dilatations. Dilatation des gaz. Fusion et vaporisation. Hygrométrie. Calorimétrie. Théorie mécanique de la chaleur. Machines à vapeur 839

Acoustique. — Propagation du son. Sons musicaux, tuyaux sonores. Vibrations des corps solides 846

Optique. — Photométrie. Réflexion de la lumière. Réfraction de la lumière. Lentilles. Instruments d'optique. Ondes lumineuses 847

Électricité. — ***Électricité statique.*** — Charges, potentiels, capacités. Energie électrique. Condensateurs — ***Magnétisme.*** — ***Électricité dynamique.*** — Piles, résistances. Loi d'Ohm. Courants dérivés. Effets calorifiques des courants. Effets chimiques des courants. Galvanomètres. Electroaimants. Induction. Machines d'induction. Moteurs électriques. Eclairage électrique. Courants alternatifs 852

Physiciens cités dans l'ouvrage 863

Table des matières 865

TYPOGRAPHIE FIRMIN-DIDOT ET Cie. — MESNIL (EURE).